



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE**

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**VENKOVNÍ APLIKACE FOTOKATALYTICKÝCH  
MATERIÁLŮ**

OUTDOOR APPLICATIONS OF PHOTOCATALYTIC MATERIALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Monika Šimončíčová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Michal Veselý, CSc.**

**BRNO 2019**

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1364/2018 Akademický rok: 2018/19  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Studentka: **Monika Šimončíčová**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: Spotřební chemie  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Michal Veselý, CSc.**

### Název bakalářské práce:

Venkovní aplikace fotokatalytických materiálů

### Zadání bakalářské práce:

1. Připravte literární rešerši.
2. Připravte komerční omítkové směsi s příměsí fotokatalyzátorů a vytvořte 3 mm tlusté vrstvy omítky.
3. Testujte fotokatalytickou aktivitu připravených materiálů na povrchové modelové reakci degradace barviva při použití slunečního simulátoru.
4. Pomocí UV–VIS spektroskopie hodnotte fotokatalytickou aktivitu připravených směsí.
5. Získané výsledky diskutujte.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 24.5.2019:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

-----  
Monika Šimončíčová  
student(ka)

-----  
prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
vedoucí práce

-----  
prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa zaoberá hodnotením a optimalizáciou metódy stanovovania fotokatalytickej aktivity vrstiev fasádnych omietok s prímiesou a bez prímiesi fotokatalyzátora oxidu titaničitého. Vrstvy sú skúmané na základe fotooxidácie organických farbív Acid orange 7 a metylénovej modrej, ktoré sú modelovými zlúčeninami simulujúcimi znečistenie. Degradácia organických farbív je sledovaná prostredníctvom UV-VIS spektrofotometrie a vyhodnotená stanovením rýchlostných konštánt a špecifických fotoaktivít. Snahou je zistiť, ktorá z poskytnutých fasádnych omietok vykazuje najväčšiu fotoaktivitu.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the evaluation and optimization of the method for the determination of photocatalytic activity of facade coating layers with and without photocatalyst admixture titanium dioxide. The layers are tested by the photooxidation of the organic dyes Acid orange 7 and methylene blue, which are model compounds of pollution. Degradation of organic dyes is monitored by UV-VIS spectrophotometry and evaluated by determination of rate constants and specific photoactivity. The aim is to find out which of the facade coating has the highest photoactivity.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Oxid titaničitý, Acid orange 7, metylénová modrá, fasádna omietka, fotokatalytická aktivita

## **KEY WORDS**

Titanium dioxide, Acid orange 7, methylene blue, facade coating, photocatalytic activity

ŠIMONČIČOVÁ, Monika. *Venkovní aplikace fotokatalytických materiálů* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116379>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Michal Veselý.

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracovala samostatne a že všetky použité literárne zdroje boli správne a úplne citované. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a môže byť využitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho bakalárskej práce a dekana FCH VUT.

.....

podpis študenta

Touto cestou by som sa chcela poďakovať svojmu vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Michalovi Veselému, CSc. za jeho konzultácie, odbornú pomoc a rady, ktoré mi poskytol počas písania práce. Moja vďaka patrí aj celému kolektívu laboratória 3078, rodine a priateľom, ktorí ma podporovali počas štúdia.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČASŤ.....</b>	<b>8</b>
2.1	<b>Elektromagnetické spektrum.....</b>	<b>8</b>
2.1.1	Infračervené žiarenie .....	8
2.1.2	Svetlo.....	8
2.1.3	Ultrafialové žiarenie .....	11
2.2	<b>Ultrafialová a viditeľná spektrometria .....</b>	<b>11</b>
2.2.1	Transmitancia .....	12
2.2.2	Absorptancia.....	12
2.2.3	Absorbancia.....	12
2.2.4	Lambert-Beerov zákon .....	12
2.2.5	Reflektancia.....	13
2.2.6	Optická hustota.....	14
2.3	<b>Rádiometrické a fotometrické veličiny .....</b>	<b>14</b>
2.4	<b>Oxid titaničitý.....</b>	<b>15</b>
2.5	<b>Pásmová štruktúra vodičov, polovodičov a izolantov .....</b>	<b>15</b>
2.6	<b>Fotokatalytické reakcie.....</b>	<b>16</b>
2.6.1	Heterogénna fotokatalýza.....	17
2.7	<b>Stanovenie fotokatalytickej aktivity .....</b>	<b>18</b>
2.7.1	Stanovenie pomocou zmeny kontaktného uhla kvapky vody .....	18
2.7.2	Stanovenie pomocou fotooxidácie organických farbív .....	18
2.7.3	ISO normy .....	19
2.8	<b>Meranie farebnosti.....</b>	<b>21</b>
2.8.1	Farbový priestor CIE $L^*a^*b^*$ .....	21
2.8.2	Farbová odchýlka .....	22
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....</b>	<b>23</b>
3.1	<b>Použité chemikálie, laboratórne a špecifické vybavenie a software.....</b>	<b>23</b>
3.1.1	Použité chemikálie .....	23
3.1.2	Použité laboratórne a špecifické vybavenie .....	23
3.1.3	Použitý software .....	23
3.2	<b>Hmoty omietok .....</b>	<b>24</b>
3.2.1	Akrylátové fasádne omietky.....	25
3.2.2	Minerálne fasádne omietky .....	25
3.2.3	Silikátové fasádne omietky .....	25
3.2.4	Silikónové fasádne omietky .....	25
3.2.5	Silikón-silikátové fasádne omietky .....	25
3.3	<b>Príprava vrstiev omietok .....</b>	<b>26</b>
3.3.1	Vrstvy na test s Acid orange 7 .....	26
3.3.2	Vrstvy na test podľa ISO 10678.....	27

<b>3.4</b>	<b>Príprava roztokov .....</b>	<b>28</b>
3.4.1	Príprava roztoku Acid orange 7 .....	28
3.4.2	Príprava roztoku metylénovej modrej .....	29
<b>3.5</b>	<b>Testovanie .....</b>	<b>30</b>
3.5.1	Test s Acid orange 7 pomocou skenera.....	30
3.5.2	Test s Acid orange 7 pomocou spektrofotometra s integračnou guľou .....	31
3.5.3	Test s metylénovou modrou podľa normy ISO 10678.....	32
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUSIA .....</b>	<b>35</b>
4.1.1	Vyhodnocovanie vzoriek omietok na základe zmeny súradníc CIE $L^*a^*b^*$ . 35	
4.1.2	Vyhodnocovanie vzoriek omietok na základe rýchlostnej konštanty .....	36
4.1.3	Vyhodnocovanie vzoriek omietok podľa ISO 10678.....	39
4.1.4	Celkové porovnanie fotokatalytickej aktivity fasádnych omietok.....	45
<b>5</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>ZOZNAM SKRATIEK A POUŽITÝCH SYMBOLOV .....</b>	<b>50</b>

# 1 ÚVOD

Oxid titaničitý sa radí medzi jeden z najpoužívanějších materiálov, s ktorým sa stretávame v každodennom živote. Vyskytuje sa napríklad vo farbách, kozmetických prípravkoch, ale aj v potravinárskych doplnkoch. Ako jeden z klasických nanomateriálov zaujal  $\text{TiO}_2$  pozornosť vďaka svojej fotokatalytickej aktivite.

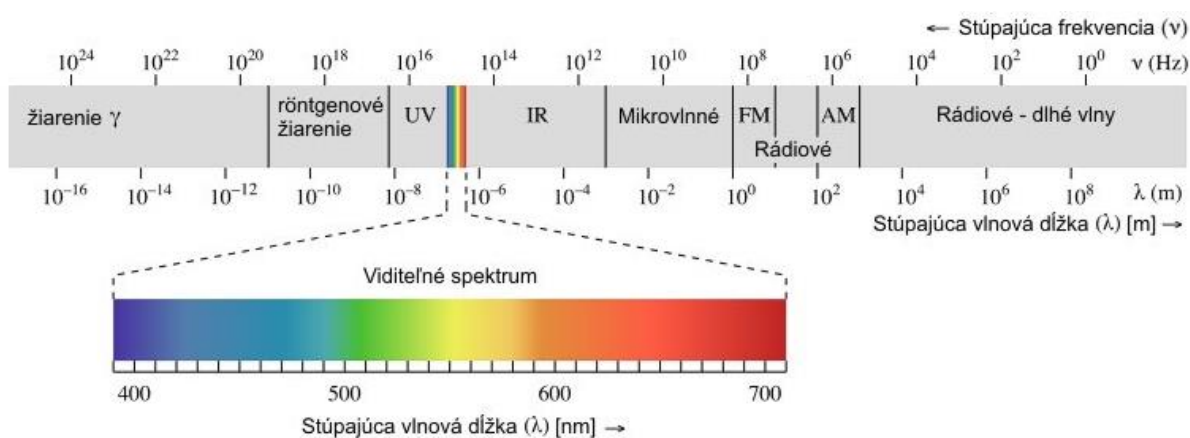
Použitie oxidu titaničitého sa javí ako vhodná alternatíva pri riešení ekologických problémov tejto doby. Medzi jeden z najviac celosvetovo diskutovaných problémov patrí znečistenie ovzdušia. Hlavnými činiteľmi spôsobujúcimi kontamináciu sú exhaláty vypúšťané do prostredia pri výrobných procesoch priemyselných tovární, ale aj výfukové plyny áut a lietadiel. Týmto spôsobom sú do atmosféry uvoľňované plynné látky (napr.  $\text{NO}_x$  a  $\text{SO}_2$ ), rovnako ako aj prchavé organické zlúčeniny a organické čistočky. Všetky spomínané zlúčeniny sa môžu usadzovať na vrstvách fasádnych omietok a spôsobovať ich znečistenie.

Estetický vzhľad budov môže značne zhoršiť znečistenie spôsobené usadeninami tmavo sfarbených častíc. Sadze môžu silne absorbovať dopadajúce svetlo, znížiť slnečnú odrazivosť, zvýšiť tepelné zaťaženie a povrchovú teplotu budovy. Ako prevencia pred tepelným zaťažením sa začali používať "chladné" materiály, ktoré sú ošetrované rôznymi pracovnými úkonmi vrátane stierania, oplachovania a umývania čistiacimi prostriedkami. Udržiavanie žiaduceho vzhľadu budov týmto spôsobom je dlhodobé náročné. Ako vhodná možnosť predchádzania znečisteniu fasád budov a tepelnému zaťaženiu budov sa javia fotokatalyticky aktívne vrstvy fasádnych omietok. Omietky, v zložení ktorých je zahrnutý fotokatalyzátor  $\text{TiO}_2$ , vykazujú samočistiaci účinok a udržujú dobrú slnečnú odrazivosť. Samočistiaci účinok je iniciovaný UV-žiarením a následne vyvolanou fotokatalytickou reakciou.

## 2 TEORETICKÁ ČASŤ

### 2.1 Elektromagnetické spektrum

Pojmom elektromagnetické spektrum sa označuje celý súhrn elektromagnetických vln. Žiarenie sa podľa vlnovej dĺžky (frekvencie, vlnótu, energie) delí na  $\gamma$ -žiarenie, röntgenové žiarenie (RTG), ultrafialové žiarenie (UV), viditeľné svetlo (VIS), infračervené žiarenie (IR), mikrovlnné žiarenie (MW) a rádiové žiarenie (RF) (Obrázok 1). Tieto druhy žiarenia nie sú od seba oddelené ostrými hranicami a ich rozpätia sú uvedené iba orientačne. Viditeľné svetlo patrí spolu so susediacim infračerveným a ultrafialovým žiarením do oblasti optického žiarenia<sup>1</sup>.



Obrázok 1 – Elektromagnetické spektrum<sup>2</sup>

#### 2.1.1 Infračervené žiarenie

Infračervené žiarenie vyčleňuje oblasť medzi najkratšími rádiovými vlnami a oblasťou viditeľného svetla. Odpovedá tomu rozsah vlnových dĺžok 1 mm až 780 nm. Infračervené žiarenie je z väčšej časti vnímané ako teplo produkované tepelnými zdrojmi. Jav, kedy dochádza k pohlcovaniu infračerveného žiarenia ožiareným telesom a ožiarené teleso je zahrievané, sa nazýva tepelná výmena. Pre človeka je infračervené žiarenie neviditeľné a vníma ho ako tepelné žiarenie. Z citlivosti ľudského oka vyplýva, že hranica medzi viditeľným svetlom a IR nie je presne definovaná<sup>3</sup>.

#### 2.1.2 Svetlo

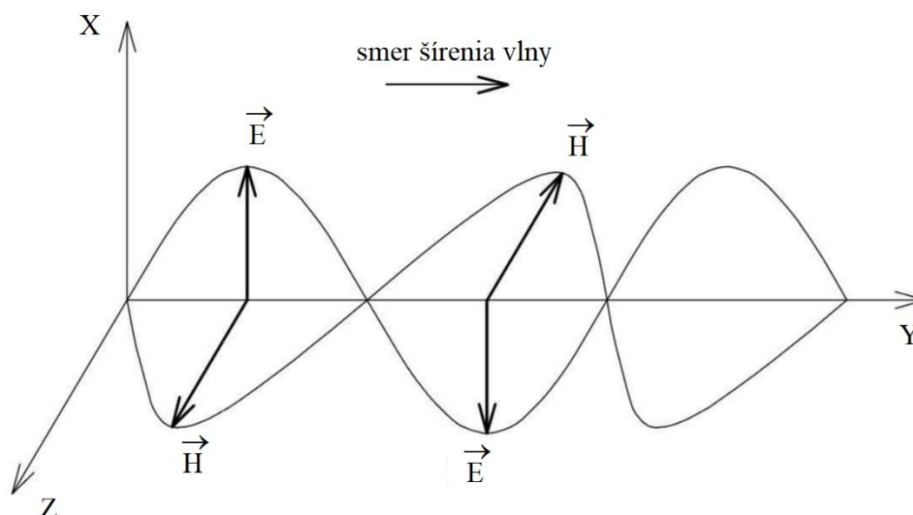
Nie je možné presne definovať hranice rozsahu viditeľného svetla, pretože sa môžu meniť v závislosti na množstve žiarivého toku dopadajúceho na sieťnicu oka a od citlivosti oka pozorovateľa (človeka). Vlnové dĺžky sa pre viditeľnú oblasť spektra udávajú v rozsahu 380 až 800 nm<sup>4</sup>.

Svetlo je premenlivé elektromagnetické pole, ktoré k svojmu šíreniu nepotrebuje látkové prostredie. Najlepšie sa prenáša vo vákuu vo forme priečnej vlny rýchlosťou  $2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . V iných prostrediach je rýchlosť svetla nižšia ako vo vákuu. Má vlnovo-



korpuskulárny charakter, čo znamená, že sa súčasne správa ako vlnenie a taktiež ako prúd častíc. Vlnová povaha svetla sa prejavuje odrazom, lámaním, ohýbaním, interferovaním a rozptyľovaním. Korpuskulárny, časticový charakter popisuje správanie svetla ako prúdu fotónov (elementárnych kvánt energie). Z týchto vyjadrení vyplýva, že svetlo je vyžarované a pohlcované ako častice, ale šíri sa ako vlny. Tomuto javu sa taktiež hovorí dualizmus<sup>5,6</sup>.

Elektromagnetické žiarenie sa skladá z periodicky sa meniaceho elektrického ( $\vec{E}$ ) a magnetického poľa ( $\vec{H}$ ). Roviny týchto polí sú na seba vzájomne kolmé a taktiež sú kolmé na smer šírenia (Obrázok 2)<sup>6</sup>.



Obrázok 2 – Zložky elektromagnetického poľa a smer šírenia vlny vo vákuu<sup>7</sup>

Základnými parametrami vlnového charakteru žiarenia sú rýchlosť svetla vo vákuu  $c_0$ , vlnová dĺžka  $\lambda$ , frekvencia (kmitočet)  $\nu$  a vlnové číslo  $\tilde{\nu}$ . Vlnová dĺžka predstavuje vzdialenosť, ktorú svetlo prejde behom jedného kmitu. Frekvenciou (kmitočtom) je charakterizovaný počet kmitov za jednotku času. Veličinu vlnočet možno použiť namiesto kmitočtu a udáva počet vlnových dĺžok pripadajúcich na jednotku dĺžky<sup>6</sup>.

Vzťahy, ktoré definujú súvislosť medzi rýchlosťou svetla vo vákuu, vlnovou dĺžkou, frekvenciou a vlnočtom sú dané rovnicami (1–4)<sup>8</sup>:

$$c_0 = \lambda \cdot \nu \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \quad (2)$$

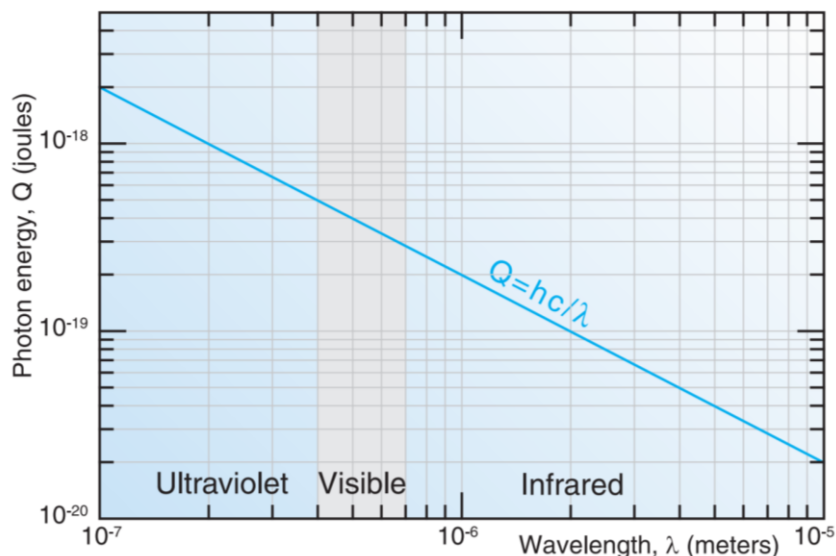
$$\nu = \frac{c_0}{\lambda} = c_0 \cdot \tilde{\nu} \quad (3)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c_0} = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

Časticový charakter žiarenia predstavujú fotóny. Fotóny sa považujú za častice a sú to žiarivé kvantá. Planckov vzťah (5) vyjadruje súvislosť medzi energiou fotónov a frekvenciou žiarenia:

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot \nu \quad (5)$$

Frekvencia je označená  $\nu$  a  $h$  je Planckova konštanta ( $h = 6,626075 \cdot 10^{-34}$  J·s). Energia fotónov je nepriamo úmerná vlnovej dĺžke a najčastejšie sa vyjadruje v jednotkách joule (J) alebo elektrónvolt (eV)<sup>8</sup>.



Obrázok 3 – Závislosť energie fotónov na vlnovej dĺžke<sup>9</sup>

### Denné svetlo

Svetlo sa delí podľa pôvodu vzniku na prírodné (denné) svetlo a umelé svetlo. Elektrické svetelné zdroje, ktoré potrebujú k svojmu fungovaniu elektrickú energiu, tvoria skupinu zdrojov produkujúcich umelé svetlo.

Zdrojom denného svetla je Slnko. Vo vnútri Slnka sa uskutočňujú termojadrové procesy, vďaka ktorým je produkované množstvo energie. V podobe elektromagnetického žiarenia sa energia vyžaruje do priestoru. Elektromagnetické žiarenie Slnka pokrýva široké spektrum od ultrafialovej cez viditeľnú oblasť a plynule prechádza do infračervenej. Jednotlivé oblasti nie sú pri vyžarovaní rovnomerne zastúpené. Najmenej je slnečné svetlo vyžarované v ultrafialovej, táto časť predstavuje asi 10 %. Vo viditeľnej časti spektra je vyžarovaných cca 40 % a približne polovica slnečného žiarenia je vyžarovaná v infračervenej oblasti.

Svetlo produkované Slnkom môže dopadať buď priamo na zemský povrch ako priame slnečné svetlo alebo je podrobené zmenám a dopadá ako oblohové, difúzne svetlo. Zmeny, ktoré nastávajú po prechode svetla atmosférou, sú označované ako extinkcia. Pojmom extinkcia sa označuje rozptyl a absorpcia žiarenia. Žiarenie môže byť absorbované a rozptýlené atmosférou rovnako ako aj inými činiteľmi. Týmito činiteľmi sú aerosólové častice, plyny alebo vodná para, ktoré sa nachádzajú v atmosfére<sup>10</sup>.

### 2.1.3 Ultrafialové žiarenie

UV je elektromagnetické žiarenie, ktoré vyčleňuje oblasť vlnových dĺžok kratších ako má viditeľné svetlo a zasahuje do oblasti röntgenového žiarenia. Rozsah vlnových dĺžok je 10 až 400 nm. Najintenzívnejším zdrojom UV žiarenia je Slnko. Ultrafialové žiarenie spôsobuje vo vysokých vrstvách atmosféry ionizáciu vzdušného kyslíka, čo má za následok vznik ozónu.

Pri pôsobení UV žiarenia na pokožku dochádza k vzniku ochranného pigmentu. Tento jav je pozorovaný ako zhnednutie pokožky a zároveň dochádza k produkcii vitamínu D. Žiarenie má teda pozitívny vplyv pri pôsobení na pokožku, avšak príliš veľké dávky ultrafialového žiarenia môžu viesť k vzniku rakoviny kože. Aj keď je UV žiarenie pre ľudské oko neviditeľné, tak má naň nepriaznivý účinok, preto je nutné chrániť oči okuliarmi so špeciálnymi sklami<sup>3</sup>.

Ultrafialové žiarenie sa delí na tri oblasti: UV-A, UV-B a UV-C. Žiarenie UV-A, nazývané aj dlhovlnné, má rozsah vlnových dĺžok 320 až 400 nm. Predstavuje väčšinu UV žiarenia, ktoré prejde ozónovou vrstvou a dopadne na zemský povrch. Preniká hlboko do pokožky a taktiež prechádza sklom. Ďalšou oblasťou je oblasť UV-B žiarenia, s rozsahom vlnových dĺžok 290 až 320 nm. UV-B žiarenie nesie stredný obsah energie a z väčšej časti je absorbované ozónovou vrstvou v atmosfére. Zložka UV-B primárne spôsobuje opálenie, ale jej účinky môžu byť aj škodlivé. Pri pôsobení na živé organizmy dochádza k dekompozícii bielkovín a organických zlúčenín. Tento jav môže viesť k narušeniu DNA a ku vzniku rakoviny. Žiarenie UV-B neprechádza sklom. Poslednou oblasťou ultrafialového žiarenia je UV-C žiarenie, ktoré má vlnovú dĺžku od 100 do 290 nm. Je najtvrdšie a zároveň karcinogénne. Má germicídne (dezinfekčné účinky), čo znamená, že je schopné ničiť všetky mikroorganizmy. Z tohto dôvodu sa používa ako dezinfekcia a sterilizácia nemocničných sál<sup>11,12</sup>.

## 2.2 Ultrafialová a viditeľná spektrometria

Spektrometria je vedný obor, ktorý sa zaoberá štúdiom interakcií medzi elektromagnetickým žiarením a pozorovanou látkou. Princípom metódy UV-VIS je absorpcia ultrafialového a viditeľného žiarenia s rozsahom vlnových dĺžok 200 až 800 nm molekulami zriedených roztokov. Pri pohltení energie infračerveného žiarenia dochádza iba k zmene rotačnej a vibračnej energie molekúl<sup>13</sup>.

Molekuly látok sú pri bežnej laboratórnej teplote v základnej elektrónovej a vibračnej hladine. Molekula prechádza do excitovaného stavu, teda do stavu s vyššou energiou, pri pohltení fotónu. V excitovanom stave zotrváva iba určitý čas a následne sa buď žiarivými alebo nežiarivými prechodmi dostáva do základného stavu, deaktivuje sa<sup>14</sup>.

### 2.2.1 Transmittancia

Transmittancia  $T$ , označovaná aj priepustnosť, je bezrozmerná fyzikálna veličina definovaná ako podiel žiarivého toku monochromatického žiarenia, ktorý vzorka prepustila  $\phi$  a žiarivého toku žiarenia dopadnutého na vzorku  $\phi_0$  s takou istou vlnovou dĺžkou. Maximálna hodnota transmittancie môže byť 1, preto je niekedy udávaná aj v percentách. Ak sa hodnota transmittancie rovná 1, tak všetko svetlo ktoré dopadlo na vzorku bolo aj prepustené vzorkou<sup>13,14</sup>.

$$T = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (6)$$

### 2.2.2 Absorptancia

Absorptancia je veličina, ktorá je taktiež bezrozmerná. Vyjadruje pomer žiarivého toku monochromatického žiarenia absorbovaného roztokom ku žiarivému toku dopadajúcemu na vzorku s rovnakou vlnovou dĺžkou  $\phi_0$ <sup>13,14</sup>.

$$\alpha = \frac{\phi_0 - \phi}{\phi_0} \quad (7)$$

### 2.2.3 Absorbancia

Absorbancia  $A$  je miera absorpcie svetla skúmaným roztokom. Definuje sa ako záporný dekadický logaritmus transmittancie. Patrí medzi bezrozmerné veličiny a môže nadobúdať hodnoty 0 až  $\infty$ . Hodnota absorpcie vyjadruje schopnosť molekúl látky absorbovať elektromagnetické žiarenie. Zaraďuje sa medzi aditívne veličiny a to znamená, že ak dve alebo viac zložiek absorbujú žiarenie určitej vlnovej dĺžky, tak výsledná absorbancia je súčtom absorpcií jednotlivých komponent<sup>13,14</sup>.

$$A = -\log T = -\log \frac{\phi}{\phi_0} = \log \frac{\phi_0}{\phi} \quad (8)$$

### 2.2.4 Lambert-Beerov zákon

Veličiny absorbancia  $A$  alebo transmittancia  $T$  sa používajú na znázornenie absorpčných spektier v závislosti od vlnovej dĺžky, niekedy frekvencie alebo vlnočtu. Lambert-Beerov zákon popisuje absorpciu žiarenia. Zákon je vyjadrený rovnicou (9):

$$A = \log \frac{\phi_0}{\phi} = \varepsilon \cdot c_A \cdot l \quad (9)$$

Kde  $l$  je hrúbka kyvety, teda optická dráha, ktorú musí prejsť lúč a udáva sa v cm,  $c_A$  predstavuje koncentráciu absorbujúcej zložky v roztoku v jednotkách  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  a  $\varepsilon$  značí molárny absorpčný koeficient pri danej vlnovej dĺžke, má jednotku  $\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  a je charakteristický pre každú látku.

Lambert-Beerov zákon hovorí, že závislosť absorpcie na koncentrácii je lineárna, avšak iba pre zriedené roztoky, ktoré majú koncentráciu do  $0,01 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Ďalej je absorbancia priamo úmerná molárnemu absorpčnému koeficientu a dĺžke optickej dráhy<sup>15</sup>.

### 2.2.5 Reflektancia

Reflektancia je bezrozmerná veličina, ktorá sa označuje  $R$ . Predstavuje špecifickú vlastnosť pevných vzoriek odrážať svetlo. Je definovaná ako pomer množstva svetla odrazeného od pevnej vzorky  $\phi_R$  k množstvu svetla, ktoré dopadlo na vzorku  $\phi_0$ .

$$R = \frac{\phi_R}{\phi_0} \quad (10)$$

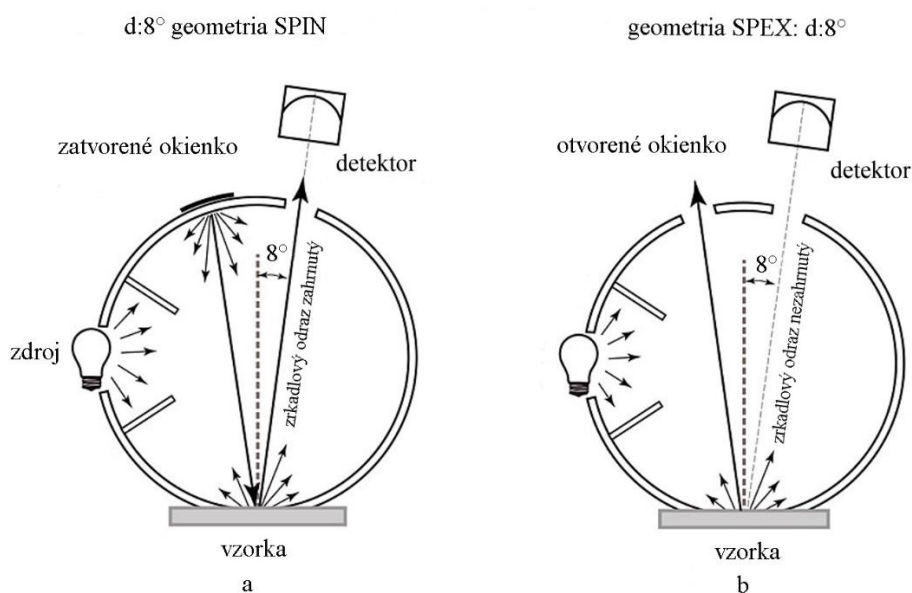
Existujú dva prípady odrazu svetla, ktoré môžu nastať po dopade na pevnú vzorku. Jedná sa o zrkadlový (priamy) alebo rozptýlený (difúzny) odraz. Priamy odraz nastáva po dopade svetla na hladný povrch a k difúznemu odrazu dochádza pri dopade svetla na drsný povrch. Ak dochádza k difúznemu odrazu, teda ak je svetlo rozptýlené do všetkých smerov, tak sú spektrometre vybavené zariadením nazývaným integračná guľa<sup>16</sup>.

#### Integračná guľa

Integračná guľa je dutá guľa, na ktorej vnútorný povrch je nanosený biely difúzne rozptyľujúci materiál. Vlastnosti použitého materiálu sa blížia Lambert-Beerovskému difúzeru, čo znamená, že po dopade svetla na materiál dochádza k ideálnej všesmerovej odrazivosti naprieč celým spektrom. Konštrukcia integračnej gule môže byť  $8^\circ:d$  alebo  $d:8^\circ$ . Číslo alebo písmeno pred dvojbodkou označuje umiestnenie svetelného zdroja a číslo alebo písmeno za dvojbodkou symbolizuje polohu detektora. Usporiadanie umožňuje používateľovi rozhodnúť, či bude detektorom zaznamenaná aj zrkadlovo odrazená zložka svetla.

Kompozícia integračnej gule je zložená z viacerých komponent (Obrázok 4). Symbol  $d$  pred dvojbodkou značí, že svetelný zdroj môže byť situovaný kdekoľvek. Označenie  $8^\circ$  znamená umiestnenie detektora svetelných lúčov pod uhlom  $8^\circ$ , teda blízko kolmice. Na opačnej strane kolmice, taktiež pod uhlom  $8^\circ$ , je umiestnené okienko. Okienko je rovnako ako aj celý povrch gule vyplnené bielym difúzne rozptyľujúcim materiálom a je možné ho otvárať a zatvárať. Situácia, kedy je okienko zatvorené, sa označuje SPIN (spekular component included), pretože je meraná aj zrkadlovo odrazená časť svetla. Opačný prípad, kedy je okienko otvorené, sa značí SPEX (spekular component excluded), vtedy do merania nie je zahrnutá zrkadlovo odrazená časť svetla. V spodnej časti integračnej gule je umiestnená vzorka určená k meraniu.

Celý dej, ktorý sa odohráva v guli, je popísaný nasledovne. Svetlo zo zdroja dopadá na protiľahlý povrch a ten odráža difúzne svetlo. Difúzne svetlo rovnomerne vyplní objem integračnej gule a dopadá na vzorku. Pri meraní difúznej reflektancie detektorom je okienko otvorené (Obrázok 4, a). Zrkadlová zložka svetla odrazená od vzorky opúšťa integračnú guľu cez okienko. Vtedy detektor zaznamenáva iba difúzne odrazené svetlo. V prípade zavretého okienka (Obrázok 4, b) zostáva zrkadlová zložka odrazeného svetla v integračnej guli. Dochádza k meraniu celkovej reflektancie. Tento aspekt je výhodou použitia integračnej gule. Používateľ sa môže rozhodnúť, či bude alebo nebude do merania zahrnutá zrkadlová zložka<sup>17</sup>.



Obrázok 4 – Prierez integračnou guľou so zavretým (a) a otvoreným (b) okienkom<sup>17</sup>

## 2.2.6 Optická hustota

Optická hustota vyjadruje mieru priepustnosti vrstvy, na ktorú dopadá svetlo alebo iné žiarenie. Jedná sa o bezrozmernú veličinu označovanú *O.D.*, ktorá je definovaná ako záporný dekadický logaritmus reflektancie<sup>18</sup>.

$$O.D. = -\log R \quad (11)$$

## 2.3 Rádiometrické a fotometrické veličiny

Rádiometria je vedný odbor zaoberajúci sa šírením elektromagnetického poľa rovnako ako jeho matematickým popisom. Určuje základné rádiometrické veličiny a ich rozmery. Fotometria je vedecká disciplína, ktorá skúma svetlo z hľadiska pôsobenia na oko. Veličiny popisujúce pôsobenie svetla na oko sa nazývajú fotometrické veličiny. Prehľad základných rádiometrických a fotometrických veličín spolu s jednotkami je uvedený v tabuľke (Tabuľka 1). Symbol sr označuje steradián. Priestorový uhol jeden steradián vytne na povrchu gule o polomere 1m plochu 1m<sup>2</sup> a je bezrozmernou veličinou<sup>19</sup>.

Tabuľka 1 – Základné rádiometrické a fotometrické veličiny<sup>19</sup>

fotometrické veličiny		rádiometrické veličiny	
pomenovanie	jednotka	pomenovanie	jednotka
svetelná energia	lm·s	žiarivá energia	J
svetelný tok	lm	žiarivý tok	W
svietivosť	lm·sr <sup>-1</sup> = cd	žiarivosť	W·sr <sup>-1</sup>
osvetlenie	lm·m <sup>-2</sup> = lux	ožiarenie	W·m <sup>-2</sup>
jas	cd·m <sup>-2</sup>	žiar	W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>

## 2.4 Oxid titaničitý

Oxid titaničitý je najbežnejšou titaničitou zlúčeninou. Existuje v troch polymorfných modifikáciách: rutil, brookit a anatas. Zvyšovaním teploty podliehajú jednotlivé modifikácie nevratným premenám. Anatas sa pri zahrievaní na 860 °C premieňa na brookit a brookit sa pri ohrievaní na 1040 °C premieňa na rutil. Jemné častice  $\text{TiO}_2$  môžu byť použité k vytvoreniu nepriehľadných vrstiev, pretože extrémne silne rozptyľujú dopadajúce svetlo. Kryštály oxidu titaničitého väčších rozmerov sú priehľadné<sup>20-22</sup>.

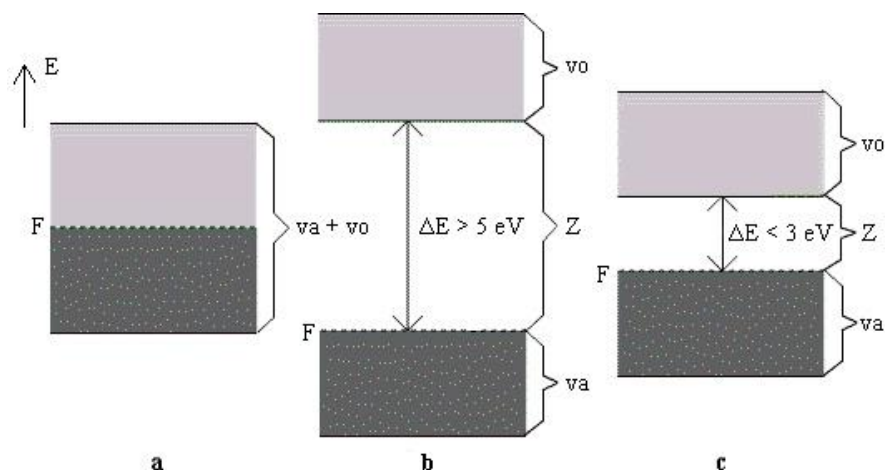
Existuje množstvo oxidov, ktoré by mohli byť použité k fotokatalytickým účelom, pretože majú polovodičové vlastnosti. Nie všetky sú však vhodné k aplikácii, pretože nie sú chemicky stále a podliehajú korózii. Oxid titaničitý je najvhodnejší polovodič pre fotokatalýzu. Pre anatas je šírka pásu zakázaných energií 3,23 eV, čo odpovedá UV žiareniu o vlnovej dĺžke 388 nm. V štruktúre rutil je šírka pásu zakázaných energií 3,02 eV, čomu prislúcha vlnová dĺžka 413 nm. Väčšiu redukčnú schopnosť majú elektróny vzniknuté v anatase na rozdiel od elektrónov vzniknutých v rutile, pretože majú väčšiu energiu. Medzi ďalšie výhody sa radia jeho vlastnosti, ktorými sú fotostabilita, fotokatalytická aktivita a odolnosť voči korózii. Cenová dostupnosť je taktiež dôležitým aspektom<sup>23,24</sup>.

## 2.5 Pásmová štruktúra vodičov, polovodičov a izolantov

Pevné látky sú tvorené obrovským množstvom atómov. Dôsledkom tohto javu je, že v tuhej fáze neexistujú diskrétné energetické hladiny, ale kontinuálne energetické pásma. Pásmová štruktúra odpovedá prípustným energetickým stavom všetkých elektrónov v kryštalických látkach. Oblasti nachádzajúce sa v pevných látkach sú valenčné, vodivostné a zakázané pásmo. Vo valenčnom pásme sa bežne nachádzajú elektróny pri teplote 0 K. Je to vlastne posledné pásmo, ktoré je zaplnené elektrónmi. Posledná hladina obsadená elektrónmi vo vnútri pásu sa nazýva Fermiho hladina. Následne, prvé neobsadené elektrónové pásmo je pomenované vodivostné pásmo, pretože elektróny z valenčného pásma nemôžu prispievať k elektrickej vodivosti materiálu. Tieto dve pásma môžu byť oddelené bariérou nazývanou aj band gap alebo zakázané pásmo. Zakázané pásmo má rozsah energetických hladín, v ktorých nemôžu existovať elektróny. Predstavuje minimum svetelnej energie, potrebnej k excitácii elektrónu z valenčného do vodivostného pásma. Od šírky zakázaného pásma závisí schopnosť látky viesť elektrický prúd. Na základe týchto troch pásiem sa materiály delia na tri druhy a sú nimi vodiče, polovodiče a izolanty.

Materiály, u ktorých sa valenčné pásmo prekrýva s pásmom vodivostným sa nazývajú vodiče. Stačí veľmi malá energia k tomu, aby prešli elektróny z valenčného pásma do vodivostného pásma. Polovodiče majú medzi valenčným a vodivostným pásmom malú energetickú bariéru. Po dodaní určitej energie môže dôjsť k excitácii elektrónov z valenčného pásma do vodivostného. Avšak, ak je valenčné a vodivostné pásmo oddelené od seba veľkou bariérou, vzdialenosťou, tak sa jedná o materiály nazývané izolanty.

Obrázok 5 značí zobrazenie valenčného pásma (va), ktoré je znázornené tmavým sfarbením a bledé sfarbenie symbolizuje vodivostné pásmo (vo). Označenie va-vo predstavuje valenčne-vodivostné pásmo, Z značí zakázaný pás a F je symbol pre Fermiho hladinu<sup>25,26</sup>.



Obrázok 5 – Energetické pásma a) vodiča, b) izolantu, c) polovodiča<sup>27</sup>

## 2.6 Fotokatalytické reakcie

Pojmom fotokatalytické reakcie sa označujú reakcie, ktoré potrebujú iniciáciu svetla a fotokatalyzátoru, aby došlo k chemickému rozkladu látok. Fotokatalyzátor, polovodič, je teda komponenta, na povrchu ktorej prebieha fotokatalytický proces. Štruktúrne je tvorený tromi energetickými pásmami a sú nimi: valenčné, vodivostné a zakázané pásmo<sup>28</sup>.

Fotokatalýza sa delí na homogénnu a heterogénnu. Homogénna fotokatalýza prebieha v jednej fáze, obvykle v roztoku. Najčastejšie používané fotokatalyzátory pri fotokatalytických reakciách sú oxidy  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$  alebo sulfidy  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ . Táto práca sa bude zaoberať použitím fotokatalyzátoru  $\text{TiO}_2$ .

Na základe polovodičovej štruktúry oxidu titaničitého sú elektróny a diery valenčného pásma generované svetelnou energiou. Energia musí byť väčšia alebo rovná energii zakázaného pásma, aby bol absorpciou fotónov UV žiarenia fotokatalyzátorom vyvolaný vznik páru elektrón-diera. Absorpciou fotónov dochádza k vypudeniu elektrónu z valenčného pásma do vodivostného pásma polovodiča, čo má za následok vznik diery. Priebeh reakcie na fotokatalyzátore, teda vznik páru elektrón-diera, sa dá vyjadriť rovnicou (12).



Diery ( $p^+$ ) vo valenčnom pásme disponujú väčším oxidačným potenciálom ako je redukčný potenciál elektrónov ( $e^-$ ) vo vodivostnom pásme<sup>29</sup>.

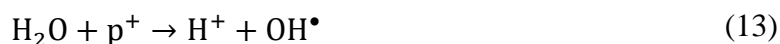


### 2.6.1 Heterogénna fotokatalýza

Pri heterogénnej fotokatalýze nastáva rozklad látok (polutantov) nachádzajúcich sa v prostredí, ktorým môže byť plynná fáza, čisto organická kvapalná fáza alebo vodný roztok. Mechanizmus heterogénnej fotokatalýzy možno rozdeliť do niekoľkých krokov:

1. transport reaktantov v tekutej fáze k povrchu fotokatalyzátoru,
2. adsorpcia reaktantov na povrch fotokatalyzátoru,
3. chemická reakcia na povrchu fotokatalyzátoru,
4. desorpcia produktov z povrchu fotokatalyzátoru,
5. transport produktov z povrchového fotokatalyzátoru.

Vo vodnom roztoku je vrstva molekúl vody naadsorbovaná na povrchu fotokatalyzátora. Dochádza k vzniku hydroxylových radikálov podľa rovnice (13), pretože na povrchu fotokatalyzátoru sú naviazané molekuly vody, ktoré sú oxidované dierami.



Vzdušný kyslík rozpustený vo vode je redukovaný elektrónmi vzniknutými vo forme páru elektrón-diera. Reakcia prebieha podľa rovnice (14) a jedná sa o redukciu za vzniku superoxidového radikálu<sup>29</sup>.



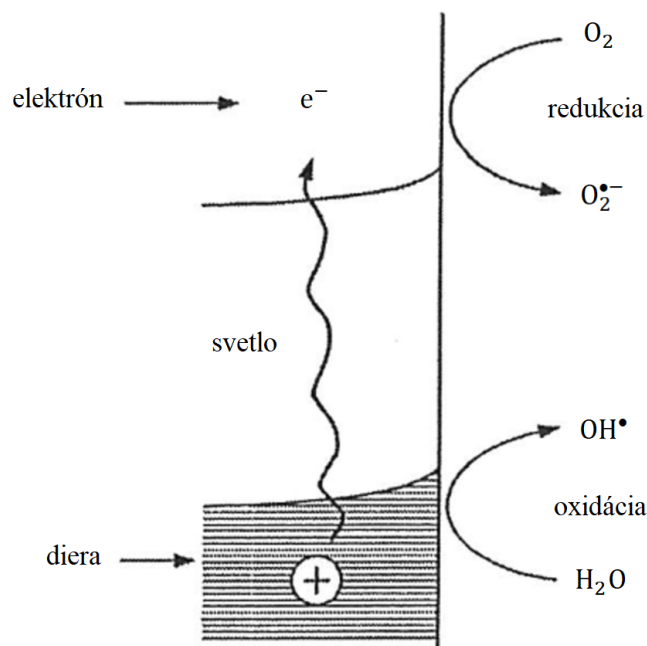
Vzniknutými dierami a hydroxylovými radikálmi dochádza k rozkladu látky (polutantu). Polutanty (X) sa nachádzajú buď priamo naadsorbované na povrchu fotokatalyzátora alebo sú obsiahnuté v plynnnej fáze, organickej kvapalnej fáze alebo vo vodnom roztoku, ktoré obklopujú fotokatalyzátor. Rozklad znečisťujúcej látky (polutantu) je zobrazený rovnicami (15, 16) a jedná sa o oxidáciu<sup>30</sup>.



Počas reakcie môže dochádzať k rekombinácii elektrón-diera, popísanou rovnicou (17). Rekombináciou dochádza k degradácii fotoelektrickej energie na teplo. Symbolom  $N$  je označený neutrálny stav a  $E$  je označená energia<sup>29</sup>.



Indikátorom maximálnej účinnosti fotokatalytickej reakcie je pomer rýchlosti rekombinácie elektrón-diera ku rýchlosti vzniku páru elektrón-diera<sup>30</sup>.



Obrázok 6 – Reakčný mechanizmus  $\text{TiO}_2$  fotokatalýzy<sup>30</sup>

## 2.7 Stanovenie fotokatalytickej aktivity

Fotokatalytická aktivita povrchov sa môže značne líšiť a závisí od mnohých faktorov, ktorými sú hrúbka filmu, substrát, drsnosť, veľkosť kryštálov  $\text{TiO}_2$  alebo teplota nanášania. Existuje mnoho rôznych metód, ktoré môžu byť použité na stanovenie aktivity fotokatalytických povrchov. Metódy sú založené na vytvorení štandardných podmienok pre testovanie a na štandardnom spôsobe vyhodnotenia, aby mohlo dôjsť k porovnávaniu fotokatalytických povrchov medzi sebou<sup>31</sup>.

### 2.7.1 Stanovenie pomocou zmeny kontaktného uhla kvapky vody

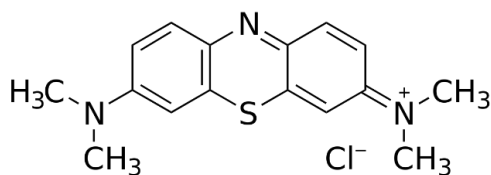
Populárnou metódou stanovovania fotokatalytickej aktivity je sledovanie zmeny kontaktného uhla kvapky vody. Hodnota kontaktného uhla udáva stupeň vodnej odpudivosti látky. Znamená to, že kvapka vody na filme vytvorenom z oxidu titaničitého vykazuje kontaktný uhol niekoľko desiatok stupňov, povrch je teda hydrofóbny. Ak na testovací povrch pôsobí UV-žiarenie, tak kontaktný uhol kvapky sa znižuje a povrch sa stáva hydrofilný<sup>32</sup>.

### 2.7.2 Stanovenie pomocou fotooxidácie organických farbív

Medzi populárne techniky patria techniky založené na fotooxidácii organických farbív, ktoré sú modelovými zlúčeninami simulujúcimi znečistenie. Príkladom modelovej zlúčeniny je Acid orange 7, resazurin alebo metylénová modrá. Pri vyhodnocovaní fotokatalytickej aktivity pomocou fotooxidácie farbív je sledovaná rýchlostná konštanta degradácia farbiva, ktoré bolo použité pri testovaní<sup>31</sup>.

### Metylénová modrá

Metylénová modrá (MB) je heterocyklická aromatická zlúčenina, ktorá je rozpustná vo vode (Obrázok 7). Jej použitie má význam najmä v oblasti biológie a chémie<sup>33</sup>.

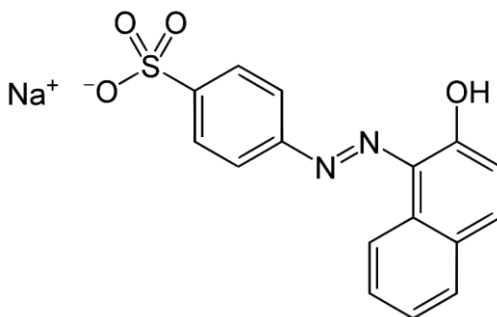


Obrázok 7 – Štruktúra metylénovej modrej<sup>34</sup>

Metylénová modrá je populárna zlúčenina, pretože sa používa ako znečisťujúca látka pri fotokatalýze polovodičov a vyznačuje sa nízkou absorbanciou v rozmedzí vlnových dĺžok 350 až 450 nm. Farbivo MB sa používa pri hodnotení fotokatalytických materiálov, fotoreaktorov a svetelných zdrojov<sup>33</sup>.

### Acid orange 7

Acid orange 7 (AO7) patrí do skupiny azofarbív (Obrázok 8). Azofarbivá tvoria najväčšiu skupinu syntetických farbív. Vznikajú kopulačnou reakciou arendiazoniových solí s aktivovanými aromatickým zlúčeninami ako sú fenoly a arylamíny. Obsahujú azoskupinu ( $-N=N-$ ) v spojení s aromatickými systémami a auxochrómi ( $-OH$ ,  $-SO_3$ ). AO7 sa používa v papierenskom priemysle, textilnom priemysle na farbenie vlny, ale aj v kozmetike. Taktiež má využitie pri stanovovaní fotokatalytickej aktivity<sup>35,36</sup>.



Obrázok 8 – Štruktúra Acid orange 7<sup>37</sup>

### 2.7.3 ISO normy

Medzinárodná organizácia pre štandardizáciu (ISO) je svetovým developerom a vydavateľom medzinárodných štandardov. Pozostáva zo siete národných inštitútov a jej centrum sídli vo Švajčiarsku, v Ženeve. Táto mimovládna organizácia je schopná prostredníctvom konsenzu expertov v danej oblasti vytvárať štandardy.

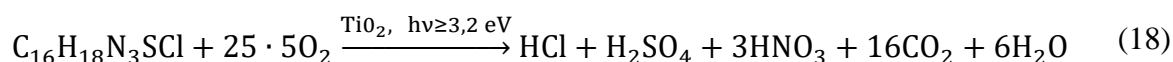
Norma je podrobný predpis, ktorý stanovuje dôležité parametre alebo vlastnosti materiálu a rovnako môže popisovať pracovný postup. Funkcia noriem je uplatnená vo výskumnej

sfére, kde je možné podľa určitej normy zopakovať pracovný postup, ktorý vedie ku štandardizácii. Normy ISO vypracúvajú technické výbory zložené z národných expertov z tých sektorov, ktoré o tieto normy požiadali. Všetky medzinárodné normy musia byť preskúmané do 3 rokov od doby vydania. Následne po prvom preskúmaní musia byť normy preverené každých 5 rokov<sup>33</sup>.

### **Norma ISO 10678; 2010, the ‘Determination of photocatalytic activity of surfaces in an aqueous medium by degradation of methylene blue‘**

Norma ISO 10678; 2010, the ‘determination of photocatalytic activity of surfaces in an aqueous medium by degradation of methylene blue‘ (ďalej už iba Norma ISO 10678), popisuje stanovenie fotokatalytickej aktivity fotoaktívnych povrchov. Princípom je degradácia farbiva metylénovej modrej vo vodnom roztoku pri kontakte s povrchom fotokatalyzátora (polovodiča) pôsobením UV žiarenia. UV žiarenie sa využíva z dôvodu, že pri vlnovej dĺžke 315 až 400 nm nedochádza k priamej fotolýze farbiva.

Pri fotokatalytickej reakcii sa mení modré sfarbenie vodného roztoku metylénovej modrej na redukovanú bezfarebnú leukometylovú formu. Zmena sfarbenia sa sleduje v pravidelných časových intervaloch meraním absorbancie. Reakcia, pri ktorej dochádza k degradácii farbiva sa nazýva mineralizácia a je znázornená rovnicou (18):



Zároveň prebieha referenčné meranie. Vzorka fotoaktívneho povrchu je testovaná v neprítomnosti UV žiarenia alebo je UV žiarenie odstránené clonou, ktorá ho neprepúšťa.

UV žiarenie zdroja je charakterizované veličinou intenzity žiarenia, ktorá sa značí  $E$ . Počas celého experimentu na testovanú plochu vzorky pôsobí priemerná intenzita fotónov UV-žiarenia. Jej hodnota je spočítaná rovnicou (19), kde  $\lambda_{\max}$  predstavuje vlnovú dĺžku UV-žiarenia,  $E$  je intenzita žiarenia,  $h$  značí Planckovu konštantu,  $c_0$  symbolizuje rýchlosť svetla vo vákuu a  $N_A$  je Avogadrova konštanta.

$$E_p = \frac{\lambda_{\max} \cdot E}{h \cdot c_0 \cdot N_A} \cdot 3600 = \lambda_{\max} \cdot E \cdot 30074 \quad (19)$$

Pre posúdenie fotokatalytickej aktivity sa sleduje rýchlosť fotokatalytického bielenia MB vo vodnom roztoku pomocou UV/VIS spektrofotometrie. Vo výsledku je spočítaná špecifická rýchlosť degradácie, špecifická fotoaktivita a fotonická účinnosť. Fotonická účinnosť udáva mieru účinnosti fotokatalytického povrchu.

Špecifická rýchlosť degradácie  $R_{deg}$  je vyjadrená rovnicou (20), kde  $\Delta A_\lambda$  predstavuje rozdiel absorbancií v čase  $t_1$  a  $t_0$ ,  $V$  je napipetovaný objem roztoku metylénovej modrej,  $\Delta t$  označuje rozdiel časov  $t_1$  a  $t_0$ ,  $\varepsilon$  značí molárny absorpčný koeficient metylénovej modrej,  $l$  symbolizuje dĺžku kvety a  $A_{MB}$  je plocha vzorky na ktorú je aplikovaný roztok MB a pôsobí na ňu žiarenie z UV lampy.

$$R_{deg} = \frac{\Delta A_\lambda \cdot V}{\Delta t \cdot \varepsilon \cdot l \cdot A_{MB}} \quad (20)$$

Špecifická fotoaktivita  $P_{MB}$  sa spočíta podľa rovnice (21) kde  $R_{irr\ ON}$  je špecifická rýchlosť degradácie MB počas vplyvu UV žiarenia na testovaciu plochu a  $R_{irr\ OFF}$  je špecifická rýchlosť degradácie MB, ak na testovaciu plochu nepôsobí UV žiarenie.

$$P_{MB} = R_{irr\ ON} - R_{irr\ OFF} \quad (21)$$

Fotonická účinnosť  $\zeta_{MB}$  sa vyjadruje najčastejšie v percentách, pričom jej výpočet je daný rovnicou (22)<sup>33</sup>.

$$\zeta_{MB} = \frac{P_{MB}}{E_p} \cdot 100 \% \quad (22)$$

## 2.8 Meranie farebnosti

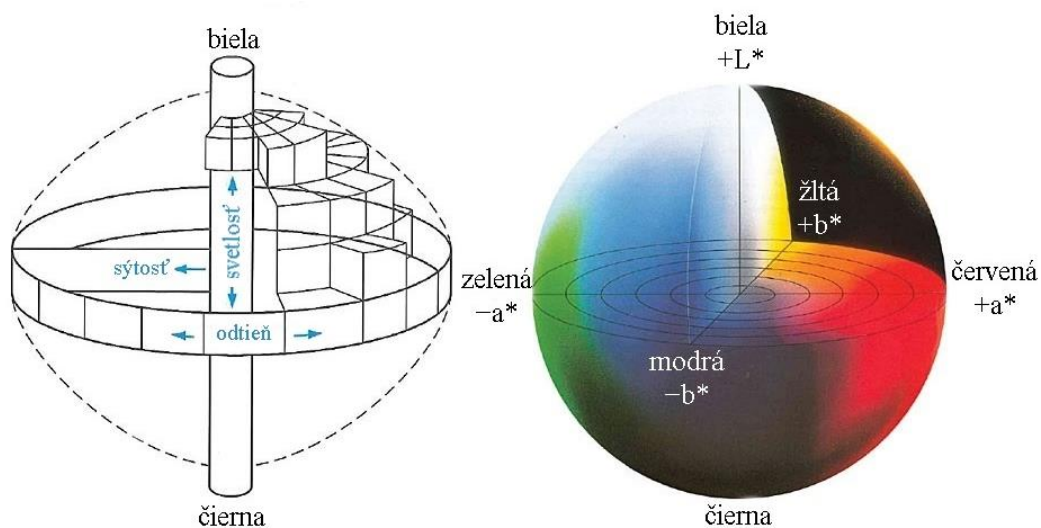
Vnem farby ľudským okom závisí od viacerých faktorov. Jedná sa o závislosť na vlastnostiach pozorovaného objektu, vlastnostiach svetelného zdroja, ktorý osvetľuje objekt a na spektrálnej citlivosti oka pozorovateľa. Farebný objekt je charakterizovaný odrazovým spektrom a zdroj je popísaný emisným spektrom. Ak sa zmení jeden z činiteľov, tak dochádza k zmene vnemu farby ľudským okom. Človek je schopný vnímať iba také farby, ktoré je ľudské oko spôsobilé zaznamenať, čo predstavuje gamut ľudského videnia<sup>38</sup>.

### 2.8.1 Farebný priestor CIE $L^*a^*b^*$

Farebný priestor CIE  $L^*a^*b^*$  je jeden zo štandardov CIE – Medzinárodnej komisie pre osvetľovanie (Commission Internationale de l'Eclairage). Oficiálny názov tohto priestoru je CIE 1976  $L^*a^*b^*$  a odvodil sa nelineárnou transformáciou od priestoru CIE XYZ. Cieľom odvodenia tohto priestoru je získanie uniformného priestoru.

Farebný priestor CIE  $L^*a^*b^*$  (Obrázok 9) je zložený z troch ôs a sú nimi:

- **os  $L$**  – predstavuje mernú svetlosť (lightness) a je špecifikovaná v rozsahu 0 až 100, kde hodnota 0 predstavuje čiernu farbu a hodnota 100 zastupuje bielu farbu,
- **os  $a$**  – nadobúda záporné hodnoty ( $-a$ ) značiace odtiene zelenej farby a kladné hodnoty ( $+a$ ) predstavujú odtiene červenej farby,
- **os  $b$**  – nadobúda záporné hodnoty ( $-b$ ), ktoré značia odtiene modrej farby a kladné hodnoty ( $+b$ ) predstavujúce odtiene žltej farby<sup>39</sup>.



Obrázok 9 – Farbový priestor CIE  $L^*a^*b^*$ <sup>17</sup>

## 2.8.2 Farbová odchýlka

Farbová odchýlka je vlastne vzdialenosť dvoch bodov v trojrozmernom priestore. Ak bod A má súradnice  $L_1^*, a_1^*, b_1^*$  a bod B má súradnice  $L_2^*, a_2^*, b_2^*$  v 3D priestore, tak ich vzdialenosť, farbová odchýlka, sa vyjadruje rovnicou (23)<sup>39</sup>:

$$\Delta E_{ab^*} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (23)$$

### **3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ**

#### **3.1 Použité chemikálie, laboratórne a špecifické vybavenie a software**

##### **3.1.1 Požité chemikálie**

- polyvinylpyrolidón
- izopropylalkohol
- demineralizovaná voda
- glycerín
- farbivo Acid orange 7
- farbivo metylénová modrá
- hydroxid sodný
- technický benzín

##### **3.1.2 Použité laboratórne a špecifické vybavenie**

- Laboratórne sklo
- Analytické digitálne váhy Sartorius Entris 224I – 1S
- Digitálne váhy SOEHNLE
- Miešačka magnetická MR Hei-Standart s ohrevom
- Teplovzdušná sušiareň Venticell
- Skener EPSON PERFECTION 4870 PHOTO
- Spektrofotometer HELIOS
- Spektrofotometer s integračnou guľou SPECORD 250 PLUS
- Komora pre slnečnú simuláciu Q-SUN Xenon Test Chambers Model Xe-1-B
- Rádiometer X9-7
- UV lampa
- Špachtľa so šírkou 7 cm
- Špachtľa so šírkou 20 cm
- Lepidlo Pattex One For All Crystal
- Aplikačná pištoľ na vytlačanie tmelov alebo lepidiel zo zásobníkov

##### **3.1.3 Použitý software**

- Microsoft Word 2016
- Microsoft Excel 2016
- Adobe Photoshop 7.0 CE
- ASpect UV
- Origin 2018b
- EPSON Scan

### 3.2 Hmoty omietok

Nemenovaná firma poskytla k testovaniu päť druhov fasádnych omietok. Každý sa líšil zložením plnív, pigmentov a najmä obsahom fotokatalyzátora  $\text{TiO}_2$ . Z každého druhu omietky boli dodané dva typy a to s fotokatalyzátorom a bez fotokatalyzátora. Dohromady bolo teda testovaných 10 typov fasádnych omietok (Obrázok 10) s hmotnosťou 500 g a ich skratky, názvy a zloženie sú uvedené v tabuľke (Tabuľka 2). Niektoré fasádne omietky boli špecifické termínom TIODISPERS. Toto pomenovanie označuje  $\text{TiO}_2$  anatasového typu, ktorý je mletý so špecifickými mlecími prísadami na veľkosť častíc 35 nm a s agregátmi o priemere 120 až 140 nm. Ďalším rozdielom bolo, že všetky typy omietok boli dodané vo forme vopred pripravenej pasty a iba minerálna omietka bez fotokatalyzátora a s fotokatalyzátorom bola dodaná v podobe suchej zmesi. Suchú zmes bolo potrebné zmiešať s požadovaným množstvom vody, ktoré bolo uvedené v technickom liste danej fasádnej omietky. Ideálny pomer pre zmiešanie a vyhotovenie pasty bol 4:1, čo znamená, že na 4 diely fasádnej omietky pripadá 1 diel vody.

Tabuľka 2 – Názvy fasádnych omietok, ich druh a zloženie

názov	druh a zloženie
AO_TR_0%	akrylátová fasádna omietka s 0 % obsahom $\text{TiO}_2$
AO_9%_TIODISPERS_NA-AS	akrylátová fasádna omietka s 9 % obsahom $\text{TiO}_2$
KO_TR_0%	silikátová fasádna omietka s 0 % obsahom $\text{TiO}_2$
KO_TR_9%	silikátová fasádna omietka s 9 % obsahom $\text{TiO}_2$
Minerálna_0%	minerálna fasádna omietka s 0 % obsahom $\text{TiO}_2$
Minerálna_3%	minerálna fasádna omietka s 3 % obsahom $\text{TiO}_2$
NO_TR_0%	silikónová fasádna omietka s 0 % obsahom $\text{TiO}_2$
NO_9%_TIODISPERS_NA-AS	silikónová fasádna omietka s 9 % obsahom $\text{TiO}_2$
Sisi_TR_0%	silikón-silikátová fasádna omietka s 0 % obsahom $\text{TiO}_2$
Sisi_TR_9%	silikón-silikátová fasádna omietka s 9 % obsahom $\text{TiO}_2$



Obrázok 10 – Poskytnuté typy fasádnych omietok



### **3.2.1 Akrylátové fasádne omietky**

Akrylátové omietky sú vysoko mechanicky odolné a možno ich čistiť tlakovou vodou. Obsahujú zložky proti hubám, riasam alebo lišajníkom, ktoré spôsobujú odstránenie nečistôt z omietok. Sú náchylné na zašpinenie vplyvom prachu. Výrobný proces je založený na báze vodnej disperzie akrylátových živíc a kremičitých pieskov. Stuhnutie omietok prebieha v dvoch krokoch. Najskôr dochádza k vypareniu vody a následne vzniká pevná štruktúra. Ich farebný tón môže byť zastúpený celou škálou farieb. Nevýhodou je nízka paropriepustnosť, preto nie sú vhodné k použitiu na zateplňovacie systémy<sup>40</sup>.

### **3.2.2 Minerálne fasádne omietky**

Výrobný proces minerálnych fasádnych omietok je založený na báze cementu a vápenného hydrátu. Po dodaní vody do suchej zmesi omietky nastáva hydratácia vápna a cementu. To je dôvodom, prečo sú minerálne omietky dodávané v suchom, sypkom stave. Výhodou je, že sú vhodné k aplikácii na zateplňovacie povrchy, pretože majú vysokú paropriepustnosť. Naopak, medzi nevýhody sa radí fakt, že nie sú veľmi mechanicky stále, preto k ich čisteniu nie je vhodné čistenie tlakovou vodou. Taktiež je obmedzená ich produkcia v rôznych farebných odtieňoch<sup>40</sup>.

### **3.2.3 Silikátové fasádne omietky**

Zloženie silikátových omietok je rôznorodé, obsahujú draselné vodné sklo, organické prísady a plnivo na báze kremičitých pieskov. Zastávajú vysokú odolnosť voči mechanickým vplyvom a taktiež sú paropriepustné. Ako alternatíva na čistenie je vhodné tlakové čistenie vodou a taktiež sú spôsobilé pri použití na zateplňovacie systémy. Medzi nevýhody sa radí ich čas tuhnutia počas nepriaznivých klimatických podmienok, pod ktorými si možno predstaviť nízke teploty a vysokú vlhkosť<sup>40</sup>.

### **3.2.4 Silikónové fasádne omietky**

Silikónové fasádne omietky vyrobené na báze vodnej emulzie silikónovej živice sú vhodné aj k interiérovej aj k exteriérovej aplikácii. Medzi popredné vlastnosti silikónových omietok sa radí vodoodpudivosť, paropriepustnosť a odolnosť voči mechanickému poškodeniu alebo poškodeniu vplyvom vetra. Vyznačujú sa svojou vlastnosťou, ktorou je ťažká pretierateľnosť<sup>40</sup>.

### **3.2.5 Silikón-silikátové fasádne omietky**

Silikón-silikátové fasádne omietky sú špecifický druh, ktorý je deklarovaný ako disperzná báza, dodatočne hydrofobizovaná dlhým reťazcom siloxánového oleja s minimálnym obsahom silikónovej emulzie. Omietka je veľmi kvalitná, čomu odpovedá aj vyššia cena. Špecifickou vlastnosťou je odolnosť voči biologickému napadnutiu hubami, plesňami alebo riasami<sup>40</sup>.

### 3.3 Príprava vrstiev omietok

#### 3.3.1 Vrstvy na test s Acid orange 7

Na uskutočnenie testu s Acid orange 7 a stanovenie fotokatalytickej aktivity povrchov fasádnych omietok boli vyhotovené 3 mm vrstvy fasád. Aby bola dosiahnutá požadovaná hrúbka vrstvy omietky, muselo byť skonštruované špeciálne zariadenie (Obrázok 11). Zariadenie sa skladalo z dosky z drevotriesky a na dosku boli pomocou obojstrannej lepiacej pásky nalepené kovové lišty. Medzi lištami bola ponechaná štrbina, ktorej rozmer odpovedal šírke podložného sklíčka. Dôvodom takto zvolenej šírky bolo naskladanie podložných sklíčok do štrbiny. Podložné sklíčka mali funkciu podkladového materiálu, na ktorom boli vytvorené vrstvy omietok. Aby po nanesení hmoty omietky na podložné sklíčka a následným rozotretím pomocou špachtle vznikali 3 mm vrstvy, tak musela byť započítaná do úvahy aj hrúbka podložného sklíčka a podľa nej bola volená hrúbka kovových lišt.

Najprv boli do štrbiny medzi kovovými lištami naskladané podložné sklíčka. Ich počet bol celkovo 4. Fasádna omietka bola dôkladne rozmiešaná a pomocou špachtle so šírkou 7 cm bolo aplikované potrebné množstvo hmoty omietky na podložné sklá. Hmota sa naniesla rovnomerne a jej prebytočné množstvo bolo zotreté špachtľou tak, aby vznikli 3 mm tenké vrstvy omietok na podložných sklíčkach. Uprostred kovovej lišty, ktorá tvorila vrchné orámovanie štrbiny, bola vytvorená pomocou pítky malá medzera. Medzera mala praktický účel, pretože do nej mohla byť zasunutá malá laboratórna špachtľa. Pomocou laboratórnej špachtle a následným posunutím podložných sklíčok so vzniknutými 3 mm vrstvami omietok po doske z drevotriesky mohli byť jednotlivé podložné sklíčka s vrstvami odnímané a poukladané na kartón. Takto uložené sklá s vrstvami omietok boli spolu s kartónom vložené do sušiarne na 2 hodiny pri teplote 50 °C . Pre každý typ omietky boli vytvorené 4 podložné sklíčka s 3 mm vrstvami omietok určené k ďalšiemu testovaniu.



Obrázok 11 – Zariadenie na vyhotovenie vrstiev fasádnych omietok pri teste s AO7

### 3.3.2 Vrstvy na test podľa ISO 10678

Rovnako ako pri teste s Acid orange 7, tak aj na test podľa ISO 10678 boli vytvorené vrstvy fasádnych omietok s hrúbkou 3 mm avšak s iným rozmerom. Zariadenie na produkciu vrstiev omietok bolo zostavené podľa požiadaviek.

V prípade testu s metylénovou modrou bol použitý hliníkový plech pokrytý vrstvou fotocitlivého materiálu ako podklad pre nanášanie vrstiev fasádnych omietok. Hliníkový plech mal rozmery 15×15 cm. Fotocitlivá vrstva na hliníkovom plechu bola odstránená pomocou 2 % hm. roztoku hydroxidu sodného.

Keďže materiálom, určeným ako podklad pre vytváranie vrstiev omietok, bol plech s inými rozmermi ako mali podložné sklá, tak bola vytvorená nová kompozícia zariadenia na vytváranie vrstiev omietok (Obrázok 12). Vzniknutá štrbina medzi kovovými lištami mala tentokrát rozmer plechu, teda 15 cm. Do štrbiny bol vložený predpripravený plech otočený nahor stranou, na ktorej bola pred úpravou fotocitlivá vrstva. Opäť bolo pomocou špachtle so šírkou 7 cm nanesené potrebné množstvo hmoty fasádnej omietky. V tomto prípade bola k vytváraniu vrstiev a odstráneniu prebytočného množstva hmoty omietky použitá špachtľa so šírkou 20 cm. Pomocou laboratórnej špachtle, ktorá bola zasunutá do medzery v kovovej lište, boli hliníkové plechy so vzniknutými 3 mm vrstvami omietok posunuté po doske z drevotriesky. Jednotlivé plechy s vrstvami omietok boli odnímané, poukladané na kartón a spolu s kartónom sa vložili do sušiarne na 2 hodiny pri teplote 50 °C. Pre každý typ omietky vo výsledku vznikol jeden plech s 3 mm vrstvou fasádnej omietky.



Obrázok 12 – Zariadenie na vyhotovenie vrstiev fasádnych omietok pri teste podľa ISO 10678

## 3.4 Príprava roztokov

### 3.4.1 Príprava roztoku Acid orange 7

Roztok Acid orange 7, ktorým sa stanovuje fotokatalytická aktivita povrchov, sa skladá z viacerých komponent. Zložkami potrebnými na prípravu roztoku sú polyvinylpyrolidón, izopropylalkohol, glycerín, demineralizovaná voda a samotné farbivo Acid orange 7.

Prvým krokom bola príprava 10 % hm. roztoku polyvinylpyrolidónu v izopropylalkohole. Najprv sa navážilo na analytických váhach do plastovej lodičky 1 g polyvinylpyrolidónu. Ďalej bolo navážených 9 g izopropylalkoholu do vhodnej kadičky, ktorá sa taktiež zvažila. Kadička spolu s roztokom izopropylalkoholu bola postavená na miešačku. Do kadičky bolo umiestnené miešadlo a mohlo nastať miešanie. Navážka polyvinylpyrolidónu bola postupne v malých množstvách pridávaná do izopropylalkoholu. Ak by sa celé množstvo návažky pridalo naraz, tak by nedošlo k jeho rozpusteniu. Dominantnou vlastnosťou izopropylalkoholu je prchavosť, preto bolo nutné na konci prípravy roztoku doplniť izopropylalkohol v takom množstve, aby mal výsledný roztok hmotnostnú koncentráciu 10 %. Prakticky bol tento proces uskutočnený zvážením obsahu kadičky a bolo doplnené množstvo izopropylalkoholu tak, aby výsledná hmotnosť roztoku činila 10 g.

Výsledný roztok AO7 obsahoval ďalšie zložky a jeho príprava prebiehala v nasledujúcich krokoch. Aby bola zjednodušená manipulácia s farbivom a aby nedošlo k jeho stratám, tak sa priamo navážilo 30 mg Acid orange 7 do uzavierateľnej nádoby (vialky). Následne boli automatickou pipetou pridané ďalšie komponenty: 0,5 ml 10 % hm. roztoku polyvinylpyrolidónu, 0,05 ml bezvodého glycerínu, 0,5 ml izopropylalkoholu a 1,25 ml demineralizovanej vody. Obsah vialky utesnenej viečkom bol dôkladne premiešaný.

Pripravený roztok AO7 bol dávkovaný na jednu stranu 3 mm vrstvy fasádnej omietky pomocou automatickej pipety v množstve 20  $\mu$ l. Na opačnú stranu bol tlačенý pomocou materiálovej tlačiarne FujiFilm Dimatix 2831 (Obrázok 13). Tlačiareň umožňuje nanášanie tekutých materiálov na substrát o veľkosti A4 s použitím jednorazovej 16-tryskovej piezo-elektrickej hlavy spojenej s 2 ml atramentovou náplňou. Výhodou tlačiarne je, že používateľ môže ako náplň zvoliť vlastný roztok, v tomto prípade to bol roztok AO7. Medzi ďalšie plus sa radí ohrievanie tlačovej hlavy alebo aj substrátu s cieľom urýchlenia odparenia rozpúšťadla a zároveň zníženia viskozity atramentu. Mechanizmus obsahuje dve kamery. Stroboskopická kamera poskytuje statické obrazy alebo spomalené video na pozorovanie procesu tvorby kvapiek, zatiaľ čo ďalšia východisková kamera sa používa na presné umiestnenie substrátu a zarovnanie následných tlačových vrstiev<sup>41</sup>.

Substrát, podložné sklíčko s 3 mm vrstvou omietky, bol upevnený na vodorovnej doske. Nad substrátom sa pohybovala tlačová hlava, čím bola uskutočnená možnosť tlačenia rôznych tvarov a vzorov. Pri tomto procese bola tlačенá jedna vrstva roztoku Acid orange 7 s rozmerom 4 cm<sup>2</sup> na protiahlú stranu vrstvy omietky, kde bola pred tým aplikovaná dávka 20  $\mu$ l roztoku AO7. Na druhé podložné sklíčko boli tlačенé dve a tri vrstvy roztoku Acid orange 7 s plochou 4 cm<sup>2</sup> (Obrázok 14).



Obrázok 13 – Materiálová tlačiareň FujiFilm Dimatix 2831<sup>42</sup>



Obrázok 14 – Vzorky určené k testovaniu vyhotovené pomocou materiálovej tlačiarne

### 3.4.2 Príprava roztoku metylénovej modrej

Najskôr bol pripravený vodný roztok metylénovej modrej s koncentráciou  $1 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Výpočtom bolo zistené, že na prípravu 500 ml roztoku o danej koncentrácii je potrebné navážiť 0,0160 g farbiva metylénovej modrej. Táto hmotnosť bola približne zvážená na analytických váhach, čomu odpovedalo množstvo 0,0161 g farbiva MB.

Norma ISO 10687 vyžaduje použitie roztoku s koncentráciou  $2 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  určeného na kondicionovanie povrchov a testovacieho roztoku s koncentráciou  $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Roztoky boli vyhotovené zriedením zásobného roztoku o koncentrácii  $1 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Výsledný pripravený objem roztoku na kondicionovanie aj testovacieho roztoku bol 1000 ml. Výpočtom pomocou zmiešavacej rovnice bolo zistené, že na prípravu 1000 ml kondicionačného roztoku je potreba napipetovať 200 ml zásobného roztoku s koncentráciou  $1 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  do odmernej banky a doplniť po risku destilovanou vodou. Obdobne bol pripravený aj testovací roztok, avšak pipetované množstvo zásobného roztoku bolo 100 ml.

## 3.5 Testovanie

### 3.5.1 Test s Acid orange 7 pomocou skenera

Skener je zariadenie, ktoré slúži k digitalizácii fyzickej predlohy, najčastejšie obsahu listiny. V experimente bol použitý skener EPSON PERFECTION 4870 PHOTO spolu so softwarom EPSON Scan. Pred skenovaním boli vzorky položené na fóliu, aby nedošlo k poškodeniu skenovacej plochy. Vzorky sa skenovali s nastavenými parametrami, ktorými sú vypnutá automatická expozícia, vypnuté úpravy farieb a vypnuté ostatné úpravy obrazu. Potom bol naskenovaný dátový súbor otvorený v programe Adobe Photoshop 7.0 CE a bol mu priradený ICC profil tohto skeneru. Na obraz skeneru sa použil filter Blure, Average. Filter zabezpečil, aby vyznačená plocha obrazu mala jednotné súradnice CIE  $L^*a^*b^*$ . Týmto spôsobom mohli byť pomocou kvapkadla priamo v programe Adobe Photoshop 7.0 CE odčítané súradnice CIE  $L^*a^*b^*$  pre fasádne omietky s natlačenou 1 vrstvou farbiva AO7.

Po zistení počiatočných súradníc CIE  $L^*a^*b^*$  naneseného farbiva AO7 boli vyhotovené kompozície 3 mm omietok spolu s aplikovanými vrstvami AO7 uložené do komory pre slnečnú simuláciu Q-SUN Xenon Test Chamber Model Xe-1-B (Obrázok 15). Komora je zariadenie zrýchlene napodobňujúce podmienky počasia, ktorými sú slnečné žiarenie a teplo. Hlavnou preferenciou je vytvorenie podmienok pre reprodukciu poškodenia kompozície behom pár týždňov, ku ktorej by inak dochádzalo v priebehu mesiacov, popripade rokov. Prístroj obsahuje xenónovú výbojku. Používateľ môže nastaviť intenzitu žiarenia, teplotu alebo čas trvania danej fázy. Komora Q-SUN je najčastejšie používaný prístroj na testovanie kompozíc vplyvom počasia, pretože vyniká jednoduchosťou a spoľahlivosťou<sup>43</sup>.

V experimente boli kompozície omietok s 1 vrstvou farbiva AO7 vložené do testovacej komory. Nastavila sa spektrálna intenzita žiarenia  $0,47 \text{ W/m}^2/\text{nm}$  pri 340 nm, teplota na  $50^\circ\text{C}$  a čas 8 min. Po 8 minútach svetelnej fázy, teda po skončení expozície v komore, došlo k skenovaniu a k následnému odčítaniu súradníc CIE  $L^*a^*b^*$ .



Obrázok 15 – Komora pre slnečnú simuláciu Q-SUN Xenon Test Chamber Model Xe-1-B<sup>43</sup>

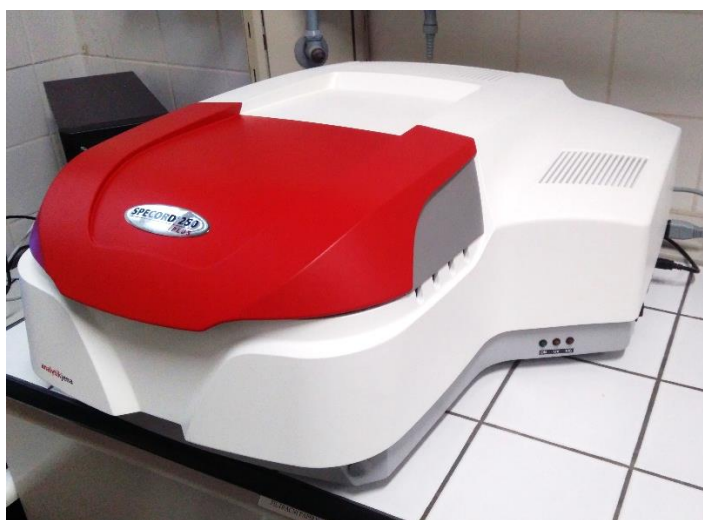


### 3.5.2 Test s Acid orange 7 pomocou spektrofotometra s integračnou guľou

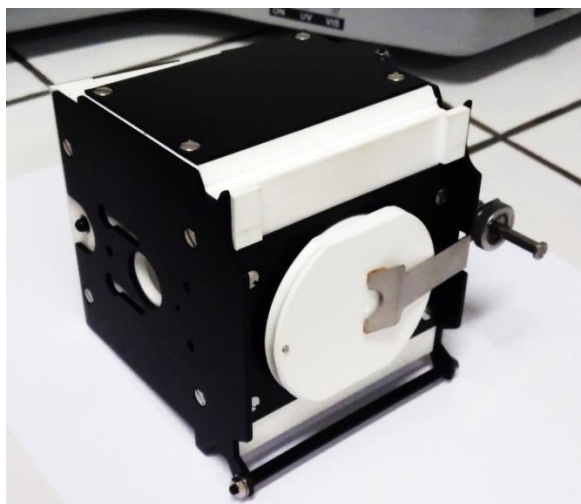
Obdobný test prebiehal pri sledovaní fotokatalytickej aktivity vrstiev omietok prostredníctvom degradácie farbiva AO7 pomocou spektrofotometra. Spektrofotometer s integračnou guľou je zariadenie, ktoré slúži na meranie absorbancie, transmitancie alebo reflektancie materiálov. Princíp fungovania integračnej (Ulbrichtovej gule) je uvedený v kapitole 2.2.5. V experimente bol použitý spektrofotometer SPECORD 250 PLUS (Obrázok 16) so softwarom ASpect UV.

Pred samotným experimentom museli byť zvolené určité parametre softwaru, za ktorých prebiehalo meranie. Bol zvolený režim Colorimetry a v ňom nadstavená metóda merania. Vo všeobecných informáciách metódy bol zvolený mód merania Reflectance v rozsahu vlnových dĺžok 380 až 780 nm s počtom bodov 5,0 nm, rýchlosťou skenu 10 nm/s a štrbinou 1 nm. V kategórii Colorvalues boli vybrané farbové súradnice modelu CIE Lab podľa EN ISO 1164, 10° pozorovateľ a štandardný illuminant D65 podľa EN ISO 11664. Ďalej sa zvolila postupnosť merania v poradí: referencia, meranie blankov a samotné meranie vzoriek. Referenčné meranie slúži na kalibrovanie prístroja na základný podklad. Blanky sú povrchy fasádnych omietok bez vrstvy farbiva Acid Orange 7. Blanky aj vzorky boli zachytené viečkom a upevnené pomocou skrutky k integračnej guli a mechanizmus integračnej gule bol vložený do spektrofotometra. S takto pripevnenými vzorkami mohlo prebiehať meranie, ktorého výsledkom boli reflektančné spektrá uložené do MS Excel a určené k ďalšiemu spracovaniu.

Po zmeraní počiatočnej odrazivosti boli vzorky s 2 a 3 vrstvami farbiva AO7 testované v komore simulujúcej slnečné žiarenie Q-SUN Xenon Test Chamber Model Xe-1-B. Nastavené parametre boli zhodné s parametrami pre svetelnú fázu v prechádzajúcom teste s 1 vrstvou AO7 (kapitola 3.5.1), avšak doba expozície simulovanému slnečnému žiareniu bola odlišná. Čas svetelnej fázy počas ktorej boli vzorky vystavené slnečnému žiareniu v komore bola zvolená nasledovne: trikrát na 2 hodiny, dvakrát na 4 hodiny a päťkrát na 8 hodín, až kým nebolo pozorované vizuálne odfarbenie vrstiev AO7. Po skončení časového intervalu každej svetelnej fázy boli vzorky premerané spektrofotometrom a dáta uložené.



Obrázok 16 – Spektrofotometer SPECORD 250 PLUS



*Obrázok 17 – Integračná guľa*

### **3.5.3 Test s metylénovou modrou podľa normy ISO 10678**

Ďalšie skúmanie fotokatalytickej aktivity fasádnych povrchov prebiehalo na základe testu s MB podľa normy ISO 10678. Norma je založená na testovaní fotoaktívnych povrchov, na ktoré je aplikovaná vrstva roztoku MB. Prostredníctvom fotometra pri danej vlnovej dĺžke absorpčného maxima MB je sledovaný úbytok absorbancie roztoku počas pôsobenia UV žiarenia.

Zariadenie, v ktorom prebiehal experiment sa skladalo zo skleného valca s vnútorným priemerom 4 cm a výškou 5 cm. Prvým pokusom bolo prilepenie skleného valca lepidlom Pattex One For All Crystal priamo na vrstvy fasádnych omietok s rozmermi 15×15 cm vytvorenými v kapitole 3.3.2 (Obrázok 18). Tento spôsob však nebol vyhovujúci, pretože štruktúra omietky je príliš porézna. Časť aplikovaného roztoku pretiekla cez póry mimo sklený valec, čo možno pozorovať zmenšením objemu roztoku metylénovej modrej vo valci a jemne modrým sfarbením v okolí vrstvy lepidla.

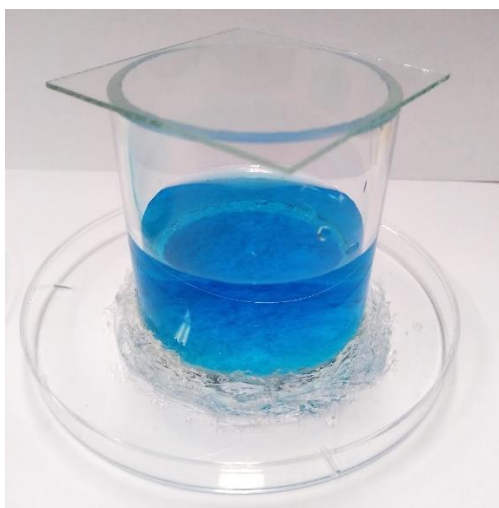


*Obrázok 18 – Valec s roztokom MB nalepený priamo na vrstvu fasádnej omietky*



Druhou variantou bolo upevnenie valca ku sklenej Petriho miske tým istým druhom lepidla (Obrázok 19). Na okraje valca sa aplikovala hmota lepidla a s touto stranou bol pritlačený k Petriho miske. K uschnutiu lepidla došlo v priebehu 24 hodín. Následne sa vystrihol kruh vrstvy omietky nanesej na hliníkový plech o veľkosti obsahu, ktorý valec ohraničoval na Petriho miske. Vystrihnutá vrstva omietky mohla byť uložená na dno valca. Je dôležité, aby pri kontakte lepidla a komponent, ktoré vytvárajú zariadenie, nedochádzalo k absorpcii farbiva aplikovaného vodného roztoku metylénovej modrej alebo k chemickej reakcii.

Ďalšou súčasťou zariadenia bola sklená platňa, ktorá slúžila na pokrytie valca, aby behom testu nedochádzalo k odparovaniu roztoku MB aplikovaného na vrstvy omietok. Je dôležité, aby materiál, ktorý pokrýval valec, prepúšťal UV-žiarenie. Intenzita zdroja produkujúceho UV-A žiarenie bola nastavená na  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  v rozsahu vlnových dĺžok 320 až 400 nm pomocou rádiometra X9-7.



Obrázok 19 – Valec s roztokom MB nalepený na Petriho misku

Pred samotným testovaním muselo dôjsť k ošetrovaniu povrchov 3 mm vrstiev fasádnych omietok. Vrstvy boli vystavené UV-žiareniu s intenzitou  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  počas dvoch hodín, aby nastalo odstránenie nečistôt z povrchov fasádnych omietok. Na takto ošetrované vzorky bolo aplikovaných 35 ml vodného roztoku metylénovej modrej s koncentráciou  $2 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , pripraveného podľa spôsobu v kapitole 3.4.2. Roztok bol určený ku kondicionovaniu povrchov a nechal sa pôsobiť 12 hodín v tme. Po dvanástich hodinách bola zmeraná jeho absorbancia a bol vymenený za 50 ml testovacieho roztoku MB s koncentráciou  $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  pripraveného podľa postupu v kapitole 3.4.2.

Najprv bolo požadované ustálenie absorbancie testovacieho roztoku za tmy, teda počas fáze, kedy bola UV lampa vypnutá. Aby sa dosiahla tma, tak sklené valce s aplikovaným testovacím roztokom boli skladované v tme, v krabiciach. V časových intervaloch 10 minút sa merala absorbancia roztokov spektrofotometrom HELIOS pri vlnovej dĺžke 664 nm, čo predstavuje absorpčné maximum metylénovej modrej. Pred odobratím časti roztoku MB musel byť obsah valca premiešaný sklenou tyčinkou, aby došlo k homogenizácii koncentrácie v celom objeme. Pomocou injekčnej striekačky bol objem testovacieho roztoku odoberaný do kyvety. Odobraná časť roztoku metylénovej modrej nesmela byť väčšia ako 10 %

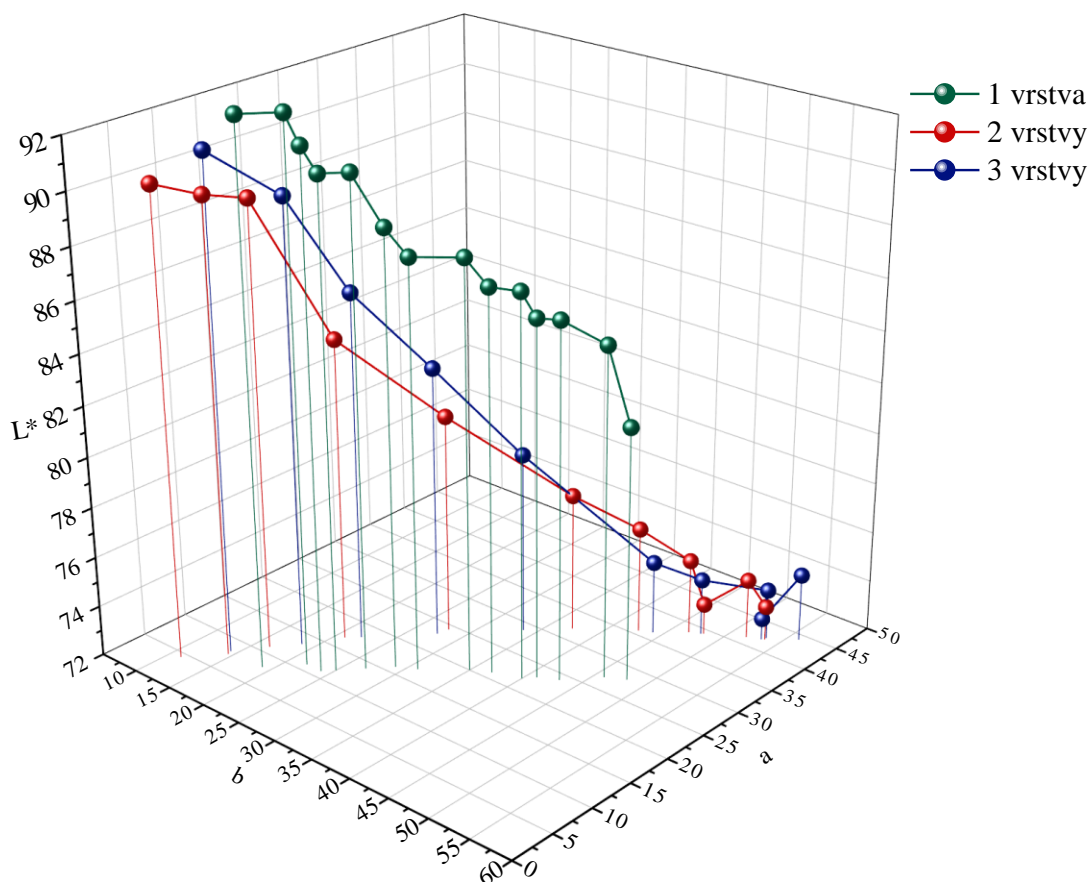
celkového objemu testovacieho roztoku, činila teda maximálne 5 ml. Po zmeraní absorbančie bol objem roztoku v kyvete vrátený späť do valca na Petriho miske. K ustáleniu hodnôt absorbančii došlo po hodine a mohlo nasledovať testovanie počas svetelnej fázy.

Skrz svetelnú fázu pôsobilo na sklený valec s testovacím roztokom UV-žiarenie. Bol sledovaný pokles absorbančie vodných roztokov MB každú pol hodinu počas doby troch hodín.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

### 4.1.1 Vyhodnocovanie vzoriek omietok na základe zmeny súradníc CIE $L^*a^*b^*$

Kompozície s 1 vrstvou Acid orange 7 boli vyhodnocované pomocou skenera s následným priamym odčítaním súradníc CIE  $L^*a^*b^*$ . Systémy, na ktoré boli aplikované dve a tri vrstvy roztoku farbiva AO7 sa hodnotili pomocou spektrofotometra s integračnou guľou. Spektrofotometrom boli namerané jednotlivé reflektančné spektrá vrstiev AO7 a z nich boli vypočítané súradnice CIE  $L^*a^*b^*$ . Súradnice jednej, dvoch aj troch vrstiev farbiva AO7 boli vynesené do 3D grafu k vizuálnemu porovnaniu. Grafy všetkých typov omietok mali podobný priebeh, preto bol vybraný jeden pre modelové znázornenie (Obrázok 20).



Obrázok 20 – Zmena CIE  $L^*a^*b^*$  súradníc počas degradácie 1, 2 a 3 vrstiev farbiva AO7 na fasádnej omietke NO\_9%\_TIODISPERS\_NA-AS

V grafe možno pozorovať, že počiatočné súradnice  $a^*$  všetkých typov fasádnych omietok s 2 a 3 vrstvami farbiva AO7 sa pohybovali v oblasti hodnôt 35 až 45 a súradnice  $b^*$  v rozmedzí 45 až 55. Tieto intervaly znamenajú, že pôvodné sfarbenie naneseného farbiva na vrstvách omietok sa javilo ako sýto oranžové. Hodnoty začiatkovej mernej svetlosti  $L^*$  kolísali v rozpätí 70 až 75, čo znázorňuje tmavšie odtiene farbiva pred expozíciou simulovanému žiareniu. Pri porovnaní s jednou vrstvou farbiva sa počiatočná hodnota súradnice  $L^*$  javila vyššia, naopak  $a^*$  a  $b^*$  nižšia, čo značí menej sýte počiatočné sfarbenie 1 vrstvy AO7. Po vystavení žiareniu, teda po skončení testu, sa hodnoty súradníc  $L^*$  ustálili

v okolí 85 až 95,  $a^*$  0 až 5,  $b^*$  0 až 10. Rozdiel veľkostí počiatočných a konečných súradníc udáva zmenu sfarbenia vrstvy farbiva Acid orange 7. Z nameraných hodnôt vyplýva, že došlo k odfarbovaniu vrstvy AO7, teda prostredníctvom pôsobenia žiarenia v komore na vrstvy fasádnych omietok dochádzalo k fotokatalytickej reakcii, ktorá spôsobila degradáciu farbiva AO7. Tieto zmeny sú zjavné aj pri vizuálnom pozorovaní vzoriek (Obrázok 21–22).



*Obrázok 21 – Vzorky 2 vrstiev farbiva AO7 s blankami pred ožiareníím*

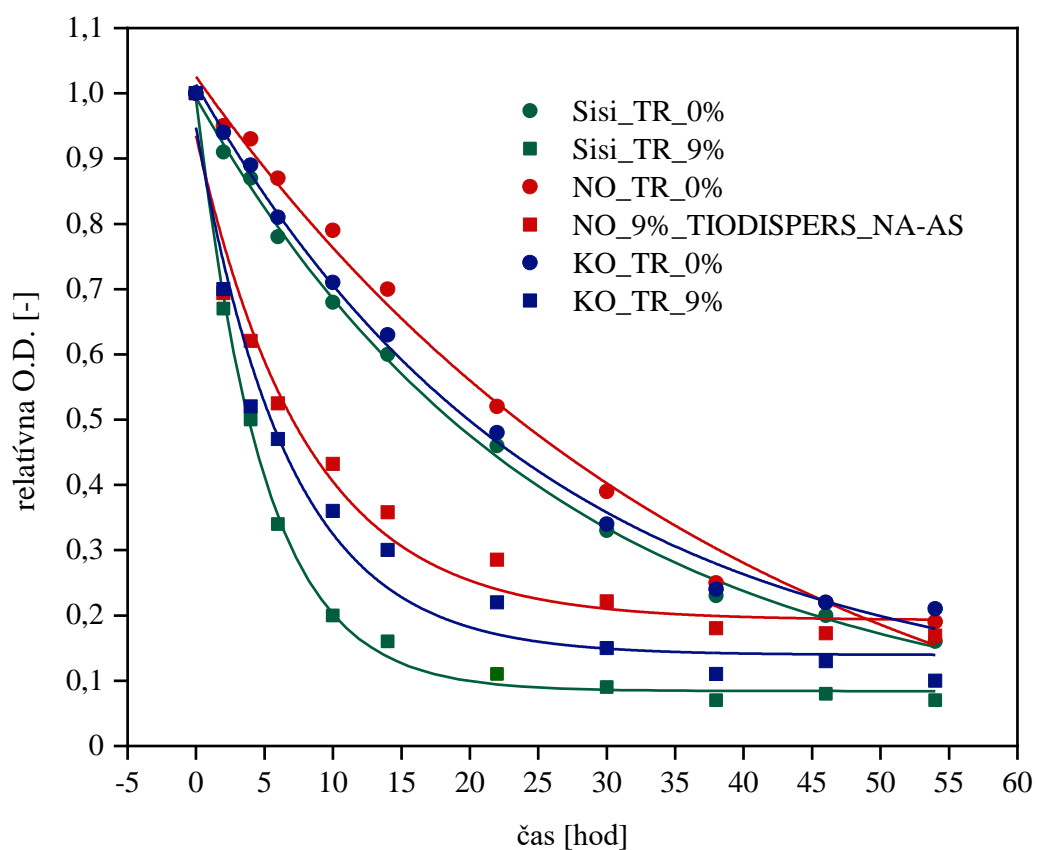


*Obrázok 22 – Vzorky 2 vrstiev farbiva AO7 s blankami po dobre ožiarenia 54 hodín*

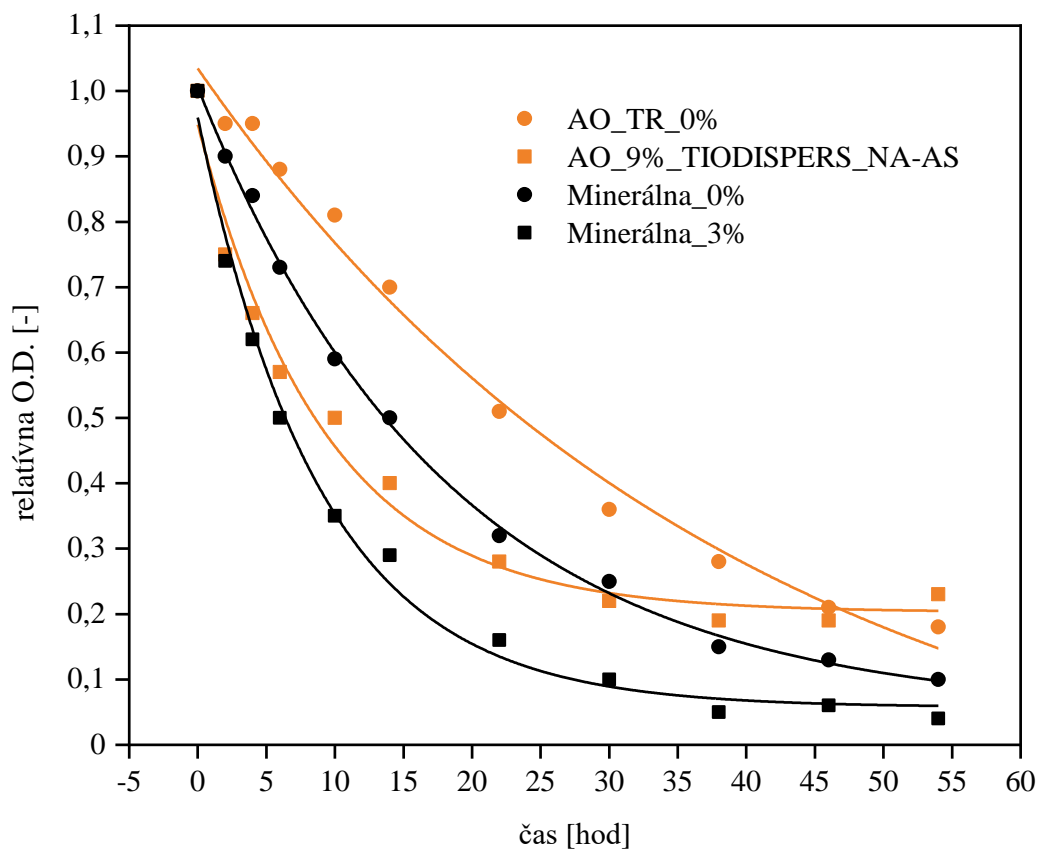
#### **4.1.2 Vyhodnocovanie vzoriek omietok na základe rýchlostnej konštanty**

Fotokatalytická aktivita vrstiev omietok s dvomi a tromi vrstvami farbiva Acid orange 7 bola vyhodnocovaná na základe spočítanej rýchlostnej konštanty degradácie AO7. Namerané hodnoty reflektancií pri vlnových dĺžkach 380 až 780 nm sa prepočítali na optickú hustotu. Z dát optickej hustoty bola vybraná hodnota pri vlnovej dĺžke 485 nm, čo predstavuje absorpčné maximum Acid orange 7. Hodnoty optických hustôt nájdené týmto spôsobom boli prevedené na relatívnu optickú hustotu. Bola vytvorená závislosť relatívnej optickej hustoty na čase, počas ktorého boli vzorky vystavené žiareniu v komore Q-SUN (Obrázok 23–26). Vynesené dáta boli preložené exponenciálnou krivkou s rovnicou ExpDec1 (24).

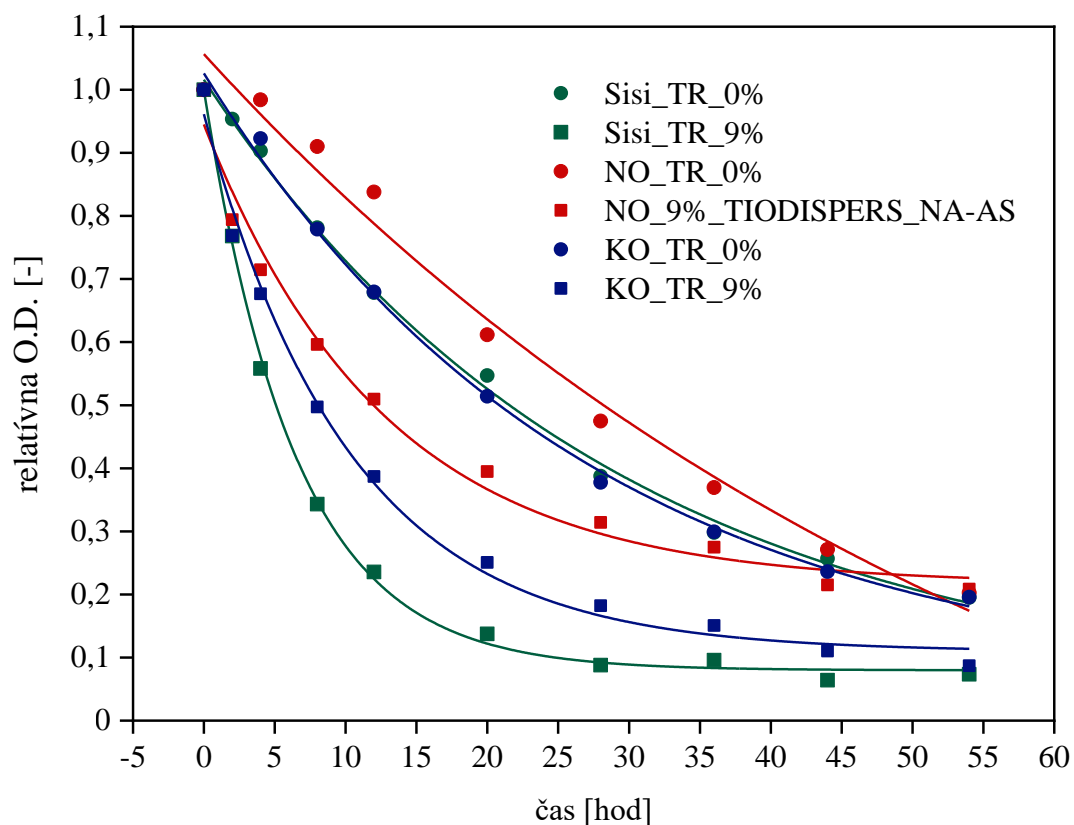
$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{-\frac{x}{t_1}} \quad (24)$$



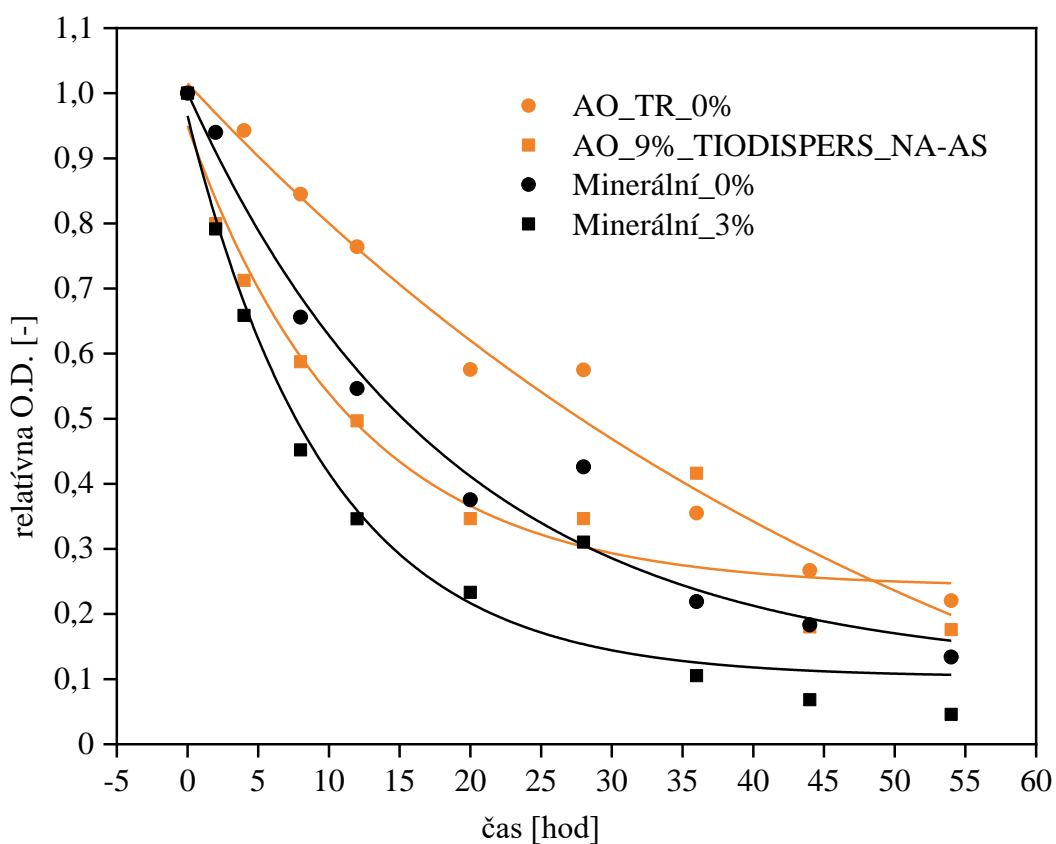
Obrázok 23 – Závislosť relatívnej optickej hustoty 2 vrstiev AO7 na čase expozície



Obrázok 24 – Závislosť relatívnej optickej hustoty 2 vrstiev AO7 na čase expozície



Obrázok 25 – Závislosť relatívnej optickej hustoty 3 vrstiev AO7 na čase expozície



Obrázok 26 – Závislosť relatívnej optickej hustoty 3 vrstiev AO7 na čase expozície

Prostredníctvom vynesenej závislosti relatívnej optickej hustoty na čase bola spočítaná formálna rýchlostná konštanta degradácie farbiva Acid orange 7  $k$  pre daný typ fasádnej omietky podľa rovnice (25).

$$k = \frac{1}{t_1} \quad (25)$$

Chyba  $\Delta t_1$  parametru  $t_1$  bola prepočítaná na chybu formálnej rýchlostnej konštanty degradácie farbiva  $\Delta k$  rovnicou (26).

$$\Delta k = \left( \frac{\Delta t_1}{t_1} \right) \cdot k \quad (26)$$

Veľkosť  $k_{x\%}-k_{0\%}$  sa vypočítala rozdielom rýchlostnej konštanty degradácie farbiva AO7 pre omietku, ktorá obsahovala fotokatalyzátor a rýchlostnej konštanty degradácie farbiva AO7 omietky bez fotokatalyzátora. Vypočítané hodnoty formálnych rýchlostných konštánt, chýb formálnych rýchlostných konštánt a rozdielov  $k_{x\%}-k_{0\%}$  sú uvedené v tabuľke (Tabuľka 3).

Tabuľka 3 – Namerané dáta a spočítané rýchlostné konštanty pre jednotlivé typy fasádnych omietok

poradie	názov fasádnej omietky	2 vrstvy AO7			3 vrstvy AO7		
		k	$k_{x\%}-k_{0\%}$	$\Delta k$	k	$k_{x\%}-k_{0\%}$	$\Delta k$
1	AO_TR_0%	0,025	0,082	0,013	0,018	0,069	0,024
2	AO_9%_TIDISPERS_NA-AS	0,108			0,087		
3	KO_TR_0%	0,039	0,108	0,019	0,043	0,054	0,008
4	KO_TR_9%	0,147			0,097		
5	Minerálna_0%	0,055	0,056	0,009	0,054	0,047	0,020
6	Minerálna_3%	0,111			0,101		
7	NO_TR_0%	0,025	0,100	0,017	0,016	0,062	0,010
8	NO_9%_TIDISPERS_NA-AS	0,125			0,079		
9	Sisi_TR_0%	0,039	0,165	0,008	0,035	0,119	0,005
10	Sisi_TR_9%	0,204			0,154		

#### 4.1.3 Vyhodnocovanie vzoriek omietok podľa ISO 10678

Vyhodnotenie fotokatalytickej aktivity 3 mm vrstiev fasádnych omietok podľa ISO 10678 bolo uskutočnené na základe výpočtu špecifickej fotoaktivity a fotonickej účinnosti povrchov. Pred zrátaním fotonickej účinnosti  $\zeta_{MB}$  podľa vzorca (22) je nutné spočítať priemernú intenzitu fotónov UV-žiarenia  $E_p$ , špecifickú rýchlosť degradácie  $R$  počas fáze kedy bola UV lampa vypnutá a zapnutá a špecifickú fotoaktivitu  $P_{MB}$  podľa rovníc (19–21). Zistené hodnoty pre každý typ vrstvy fasádnej omietky sú uvedené v tabuľkách (Tabuľka 4–13).

Tabuľka 4 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku KO\_TR\_0%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,348	0,370	10	0,110				
30	0,5	0,307	0,338	10	0,110	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$3,44 \cdot 10^{-5}$	$9,67 \cdot 10^{-6}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$
60	1,0	0,272	0,305	10	0,110	$3,76 \cdot 10^{-5}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
90	1,5	0,250	0,284	10	0,110	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$9,79 \cdot 10^{-4}$
120	2,0	0,228	0,262	10	0,110	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,71 \cdot 10^{-20}$	$2,47 \cdot 10^{-17}$
Priemer (v časoch 0 až 90 min)								$4,30 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$

Tabuľka 5 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku KO\_TR\_9%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,295	0,313	10	0,110				
30	0,5	0,284	0,291	10	0,110	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$-1,18 \cdot 10^{-5}$	$-1,08 \cdot 10^{-2}$
60	1,0	0,268	0,279	10	0,110	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$4,30 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$
90	1,5	0,254	0,263	10	0,110	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$-2,15 \cdot 10^{-6}$	$-1,96 \cdot 10^{-3}$
120	2,0	0,222	0,250	10	0,110	$3,44 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$
Priemer (v časoch 0 až 90 min)								$2,69 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$

Tabuľka 6 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku SISI\_TR\_0%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,382	0,418	10	0,110				
30	0,5	0,326	0,377	10	0,110	$6,02 \cdot 10^{-5}$	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$
60	1,0	0,286	0,349	10	0,110	$4,30 \cdot 10^{-5}$	$3,01 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
90	1,5	0,255	0,334	10	0,110	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
120	2,0	0,236	0,313	10	0,110	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$-2,15 \cdot 10^{-6}$	$-1,96 \cdot 10^{-3}$
Priemer (v časoch 0 až 90 min)								$1,54 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$

Tabuľka 7 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku SISI\_TR\_9%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,297	0,333	10	0,110				
30	0,5	0,272	0,312	10	0,110	$2,69 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$4,30 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$
60	1,0	0,260	0,293	10	0,110	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$-7,52 \cdot 10^{-6}$	$-6,86 \cdot 10^{-3}$
90	1,5	0,230	0,285	10	0,110	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$8,60 \cdot 10^{-6}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$
120	2,0	0,208	0,275	10	0,110	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
Priemer (v časoch 0 až 120 min)								$1,36 \cdot 10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$



Tabuľka 8 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku Minerálna\_0%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,549	0,529	10	0,110				
30	0,5	0,534	0,526	10	0,110	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-6}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
60	1,0	0,524	0,522	10	0,110	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$4,30 \cdot 10^{-6}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$
90	1,5	0,512	0,519	10	0,110	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-6}$	$9,67 \cdot 10^{-6}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$
120	2,0	0,500	0,511	10	0,110	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$8,60 \cdot 10^{-6}$	$4,30 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$
Priemer (v časoch 0 až 120 min)								$8,33 \cdot 10^{-6}$	$7,59 \cdot 10^{-3}$

Tabuľka 9 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku Minerálna\_3%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,538	0,527	10	0,110				
30	0,5	0,514	0,526	10	0,110	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$
60	1,0	0,492	0,519	10	0,110	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$7,52 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$
90	1,5	0,470	0,514	10	0,110	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$5,37 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
120	2,0	0,453	0,511	10	0,110	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$
Priemer (v časoch 0 až 120 min)								$1,85 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$

Tabuľka 10 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku AO\_TR\_0%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,459	0,477	10	0,110				
30	0,5	0,426	0,457	10	0,110	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$
60	1,0	0,407	0,446	10	0,110	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$8,60 \cdot 10^{-6}$	$7,83 \cdot 10^{-3}$
90	1,5	0,383	0,415	10	0,110	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$-7,52 \cdot 10^{-6}$	$-6,86 \cdot 10^{-3}$
120	2,0	0,365	0,400	10	0,110	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-6}$	$2,94 \cdot 10^{-3}$
Priemer (v časoch 0 až 120 min)								$8,60 \cdot 10^{-6}$	$7,83 \cdot 10^{-3}$

Tabuľka 11 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnú omietku AO\_9%\_TIODISPERS\_NA-AS

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,397	0,452	10	0,110				
30	0,5	0,372	0,428	10	0,110	$2,69 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$9,79 \cdot 10^{-4}$
60	1,0	0,355	0,406	10	0,110	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-7}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$
90	1,5	0,295	0,380	10	0,110	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$5,85 \cdot 10^{-2}$
120	2,0	0,260	0,366	10	0,110	$3,76 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$
Priemer (v časoch 0 až 120 min)								$3,02 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-2}$

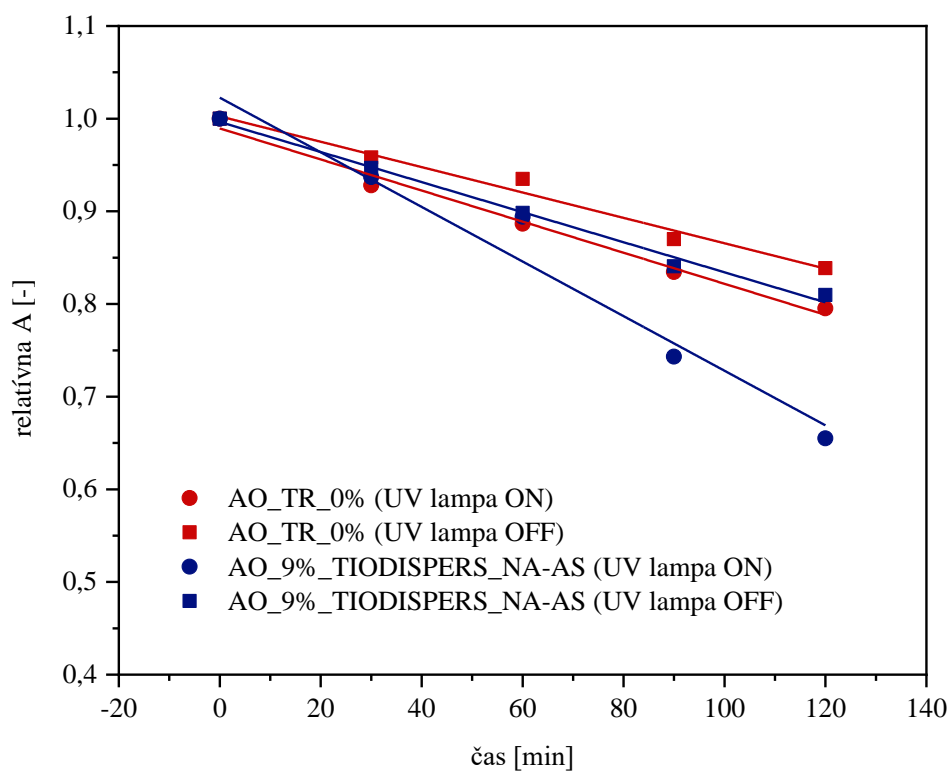
Tabuľka 12 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnu omietku NO\_TR\_0%

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,444	0,443	10	0,110				
30	0,5	0,399	0,422	10	0,110	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$
60	1,0	0,373	0,401	10	0,110	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$5,37 \cdot 10^{-6}$	$4,90 \cdot 10^{-3}$
90	1,5	0,340	0,380	10	0,110	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
120	2,0	0,326	0,357	10	0,110	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$-9,67 \cdot 10^{-6}$	$-8,81 \cdot 10^{-3}$
Priemer (v časoch 0 až 90 min)								$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$

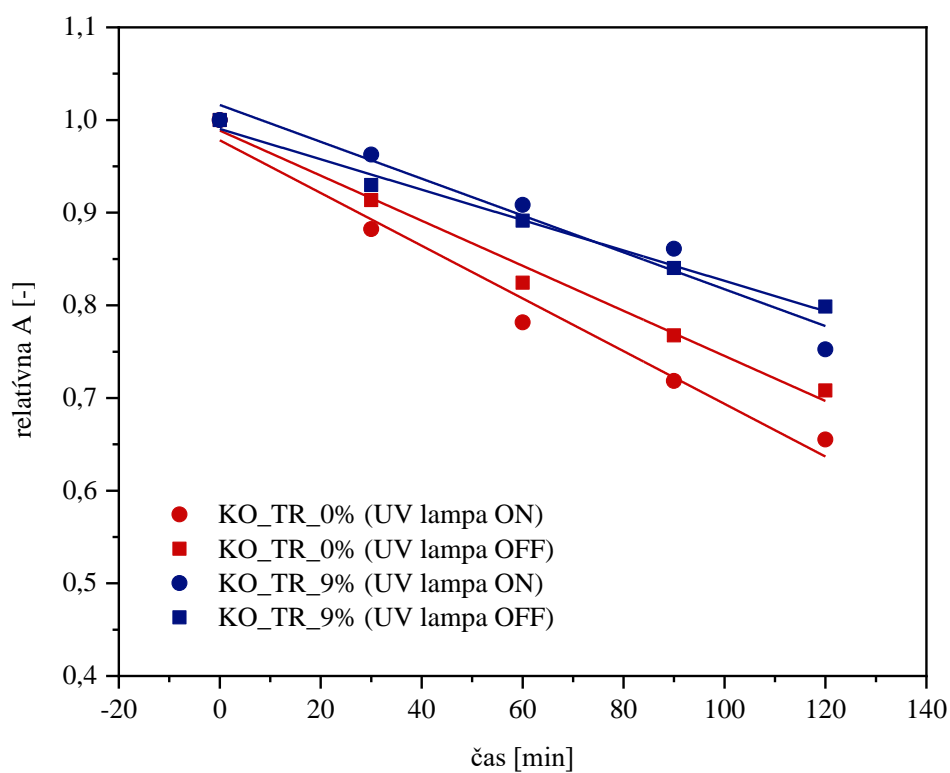
Tabuľka 13 – Namerané hodnoty absorbancií a spočítané  $E_P$ ,  $R_{irr ON}$ ,  $R_{irr OFF}$ ,  $P_{MB}$  a  $\zeta_{MB}$  pre fasádnu omietku NO\_9%\_TIODISPERS\_NA-AS

$t_m$ [min]	$t_m$ [hod]	$A_{irr ON}$ [-]	$A_{irr OFF}$ [-]	$E$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$E_P$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr ON}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$R_{irr OFF}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$P_{MB}$ [mol·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	$\zeta_{MB}$ [%]
0	0	0,381	0,436	10	0,110				
30	0,5	0,342	0,403	10	0,110	$4,19 \cdot 10^{-5}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$
60	1,0	0,284	0,382	10	0,110	$6,23 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$
90	1,5	0,241	0,363	10	0,110	$4,62 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$
120	2,0	0,204	0,349	10	0,110	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$
Priemer (v časoch 0 až 120 min)								$2,42 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$

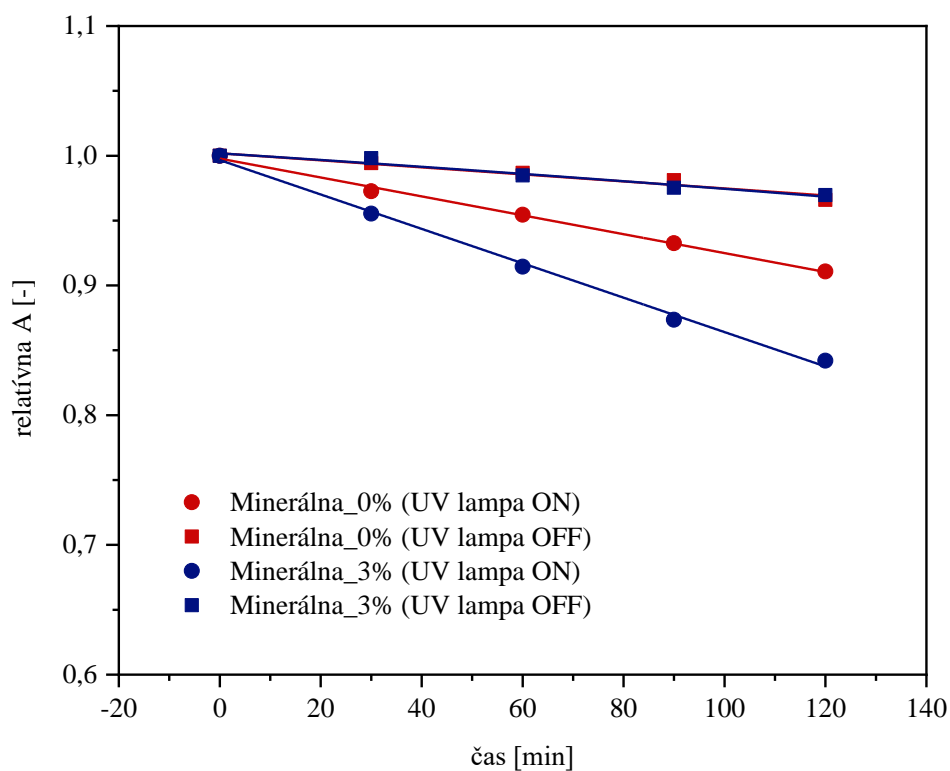
Pre grafické znázornenie priebehu fotokatalytickej reakcie počas ktorej dochádzalo k odfarbovaniu vodného roztoku metylénovej modrej boli vytvorené grafy (Obrázok 27–31). Bol sledovaný úbytok absorbancie vodného roztoku MB pre istý druh fasádnej omietky, ktorej zmes v jednom prípade obsahovala a v druhom neobsahovala fotokatalyzátor. Pokles absorbancií bol pozorovaný počas svetelnej fázy, keby bola UV lampa zapnutá (UV lampa ON) a počas fázy, cez ktorú bola UV lampa vypnutá (UV lampa OFF). U všetkých typoch omietok dochádzalo k lineárnemu poklesu absorbancií v priebehu merania. U akrylátovej, minerálnej a silikónovej fasádnej omietky s prímiesou fotokatalyzátora nastávalo výraznejšie znižovanie nameraných absorbancií počas svetelnej fázy ako v prípade omietok rovnakého druhu bez obsahu fotokatalyzátora (Obrázok 27, 29, 30). Tento jav je potvrdením, že fasádne omietky, ktoré obsahujú fotokatalyzátor vykazujú fotokatalytickú aktivitu a sú schopné rýchlejšie čistiť usadené nečistoty prostredia. Naopak u silikátovej a silikón-silikátovej fasádnej omietky s fotokatalyzátorom bol pozorovaný menej výrazný pokles absorbancií roztoku MB počas svetelnej fázy ako u omietok rovnakého druhu, ale bez obsahu fotokatalyzátora (Obrázok 28, 31). Dôvodom, prečo mohlo dôjsť k takejto situácii, je vysoká pórovitosť hmôt silikátovej a silikón-silikátovej omietky, pretože nastávalo adsorbovanie molekúl farbiva do pórov.



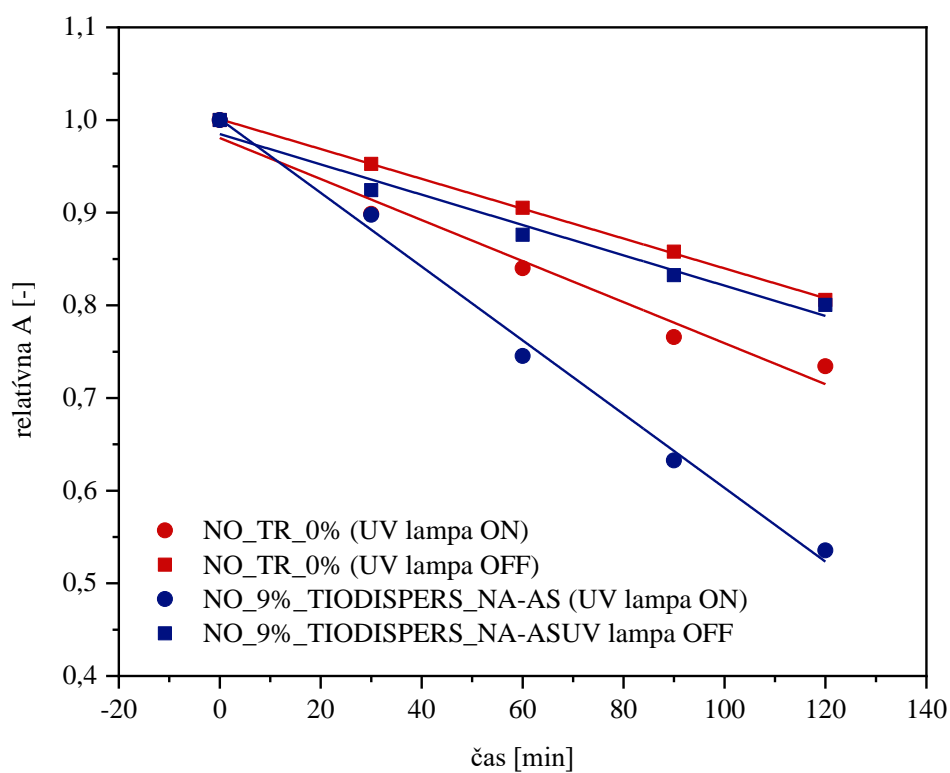
Obrázok 27 – Závislosť relatívnej absorbancie roztoku MB na čase pre akrylátovú omietku



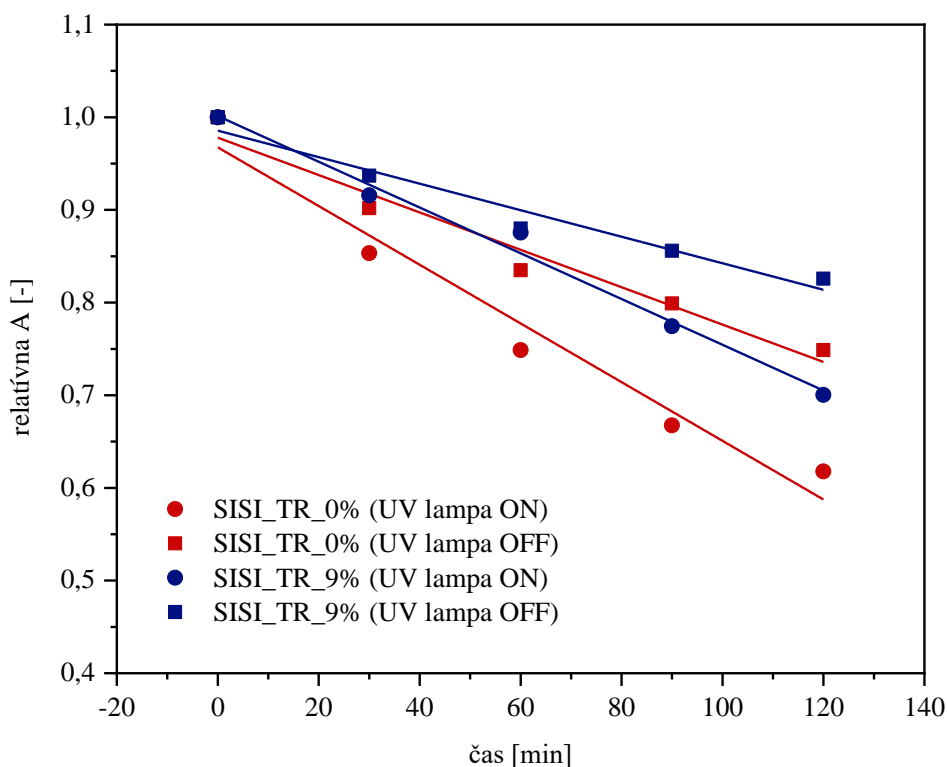
Obrázok 28– Závislosť relatívnej absorbancie roztoku MB na čase pre silikátovú omietku



Obrázok 29 – Závislosť relatívnej absorbancie roztoku MB na čase pre minerálnu omietku



Obrázok 30 – Závislosť relatívnej absorbancie roztoku MB na čase pre silikónovú omietku



Obrázok 31– Závislosť relatívnej absorbancie roztoku MB na čase pre silikón-silikátovú omietku

#### 4.1.4 Celkové porovnanie fotokatalytickej aktivity fasádnych omietok

Celkové porovnanie stanovenia fotokatalytickej aktivity fasádnych omietok rôznymi metódami bolo uskutočnené na základe zoradenia rýchlostných konštánt degradácie farbiva AO7 pre 2 a 3 vrstvy a rozdielu rýchlostí degradácie farbiva za svetla a tmy pri teste s MB. Hodnoty v poradí od najväčšej po najmenšiu a k nim priradené názvy typov fasádnych omietok vytvárajú postupnosť. Postupnosť udáva rýchlosť degradácie farbiva, teda samočistiacu schopnosť fasádnej omietky. Poradie fasádnych omietok spolu s rýchlostnými konštantami a špecifickými fotoaktivitami je uvedené v tabuľke (Tabuľka 14).

Tabuľka 14 – Porovnanie rýchlostných konštánt a špecifických fotoaktivít pre jednotlivé typy fasádnych omietok

poradie	2 vrstvy		3 vrstvy		test s MB	
	názov	k	názov	k	zoradenie	$P_{MB}$ [mol/m <sup>2</sup> h]
1	Sisi_O_TR_9%	0,204	Sisi_O_TR_9%	0,154	AO_9%_TIO_NA-AS	$3,02 \cdot 10^{-5}$
2	KO_TR_9%	0,147	Minerálna_3%	0,101	NO_9%_TIO_NA-AS	$2,42 \cdot 10^{-5}$
3	NO_9%_TIO_NA-AS	0,125	KO_TR_9%	0,097	Minerálna_3%	$1,85 \cdot 10^{-5}$
4	Minerálna_3%	0,111	AO_9%_TIO_NA-AS	0,087	SISI_TR_0%	$1,54 \cdot 10^{-5}$
5	AO_9%_TIO_NA-AS	0,108	NO_9%_TIO_NA-AS	0,079	NO_TR_0%	$1,47 \cdot 10^{-5}$
6	Minerálna_0%	0,055	Minerálna_0%	0,054	SISI_TR_9%	$1,36 \cdot 10^{-5}$
7	KO_TR_0%	0,039	KO_TR_0%	0,043	AO_TR_0%	$8,60 \cdot 10^{-6}$
8	Sisi_O_TR_0%	0,039	Sisi_O_TR_0%	0,035	Minerálna_0%	$8,33 \cdot 10^{-6}$
9	NO_TR_0%	0,025	AO_TR_0%	0,018	KO_TR_0%	$4,30 \cdot 10^{-6}$
10	AO_TR_0%	0,025	NO_TR_0%	0,016	KO_TR_9%	$2,69 \cdot 10^{-6}$

## 5 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo optimalizovať metódu stanovovania fotokatalytickej aktivity povrchov fasádnych omietok s prípadným vyhodnotením omietky, u ktorej sa vo všetkých metódach testovania potvrdila najvyššia samočistiaca schopnosť.

V experimentálnej časti boli pripravené 3 mm vrstvy omietok prostredníctvom špeciálne skomponovaného zariadenia určené k ďalšiemu testovaniu. Ako indikátor fotokatalytickej aktivity bolo použité farbivo zastávajúce funkciu modelovej zlúčeniny, ktorá simuluje nečistoty. Farbivá použité k testovaniu boli Acid Orange 7 a metylénová modrá. Sledovanie fotoaktivity prebiehalo na základe degradácie farbiva.

Vyhotovené kompozície fasádnych omietok spolu s vytlačenými vrstvami farbiva AO7 boli vystavené expozícii simulovanému slnečnému žiareniu v komore Q-SUN. Rýchlosť degradácie farbiva prostredníctvom súradníc CIE  $L^*a^*b^*$  bola monitorovaná dvoma spôsobmi. Prvou metódou bolo skenovanie kompozíc s 1 vrstvou AO7 príslušným skenerom s následným odčítaním súradníc CIE  $L^*a^*b^*$  v programe Adobe Photoshop 7.0 CE. Táto metóda sa nejavila ako vhodne zvolený postup pre stanovovanie fotokatalytickej aktivity. Dôvodom boli tieňe vznikajúce na digitálnom obraze pri skenovaní vzoriek skenerom, pretože fasádne omietky mali drsný povrch. Tieňe skresľovali súradnice CIE  $L^*a^*b^*$  a na základe týchto zistení bola metóda vyhodnotená ako nevyhovujúca.

Vhodnejšou alternatívou bolo meranie degradácie farbiva AO7 prostredníctvom spektrofotometra s integračnou guľou. Týmto spôsobom sa eliminoval vznik tieňov a boli zmerané reflektančné spektrá. Zo zistených hodnôt reflektancií boli spočítané súradnice CIE  $L^*a^*b^*$ , ktoré skutočne charakterizovali priebeh zmeny sfarbenia 2 a 3 vrstiev AO7 na povrchu omietky. Táto metóda sa javila ako vhodnejší spôsob sledovania zmien súradníc CIE  $L^*a^*b^*$  oproti experimentu so skenerom.

Ďalšou variantou bolo zhodnotenie fotokatalytickej aktivity na základe vypočítaných formálnych rýchlostných konštánt 1. rádu. Konštanty boli zistené po prevedení hodnôt reflektancií na relatívnu optickú hustotu a následným zobrazením v grafe závislosti relatívnej optickej hustoty na čase expozície v komore simulujúcej slnečné žiarenie. Vynesením hodnôt do grafu a preložením exponenciálnou krivkou boli zistené parametre, na základe ktorých boli spočítané rýchlostné konštanty degradácie farbiva AO7. Rýchlostné konštanty degradácie AO7 povrchov omietok s obsahom fotokatalyzátora dosahujú vyšších hodnôt ako rýchlostné konštanty degradácie farbiva AO7 pre fasádne omietky bez fotokatalyzátora, čo potvrdzuje lepší samočistiaci efekt povrchov omietok s  $\text{TiO}_2$ . Táto metóda bola považovaná za vhodnú pre sledovanie fotokatalytickej aktivity, pretože približne podobné výsledky (Tabuľka 14) boli dosiahnuté pri testovaní 2 a 3 vrstiev farbiva AO7.

Posledným experimentom bol ISO test degradácie metylénovej modrej vo vodnom roztoku. Časom dochádzalo k znižovaniu absorbancie roztoku MB. U niektorých typov omietok s obsahom  $\text{TiO}_2$  bol pokles absorbancií počas svetelnej fázy vyšší ako u omietok s nulovým obsahom fotokatalyzátora. Naopak dochádzalo aj k situácii, kedy omietky ktoré neobsahovali fotokatalyzátor vykazovali väčšiu fotoaktivitu ako omietky s obsahom  $\text{TiO}_2$ . Dôvodom mohla

byť vysoká pórovitosť fasádnych omietok bez fotokatalyzátora. V póroch mohlo dochádzať k naviazaniu farbiva, čo mohlo spôsobovať väčší rozdiel absorbancií v priebehu merania počas svetelnej fáze. Z tohto dôvodu bola metóda stanovovania fotoaktivity podľa normy ISO 10678 vyhodnotená ako nevyhovujúca pre určité typy fasádnych omietok.

Prostredníctvom vykonaných testov a následným porovnaním rýchlostných konštánt degradácie farbiva Acid Orange 7 so špecifickými fotoaktivitami zistenými pri teste s metylénovou modrou podľa ISO normy 10678 nebolo možné jednoznačne určiť jeden typ fasádnej omietky, ktorý by najlepšie vykazoval samočistiaci účinok.

## 6 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. Halliday D. *Fyzika : vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 4, Elektromagnetické vlny-Optika-Relativita*. Vyd. 1. ed: VUTIUM ; Prometheus; 2000.
2. Jaroš J. Rentgenové záření. <http://tesla.xf.cz/rentgen.html>. Published 2016. Accessed.
3. Jaroslav Reichl MV. Encyklopedie fyziky. <http://fyzika.jreichl.com/>. Published 2006-2019. Accessed.
4. Kuchling H. *Fyzika*. 2. upr. vyd. ed. Bratislava: Bratislava : Alfa vydavateľstvá technické a ekonomické literatury; 1980.
5. Dostál J. *Fyzika*. 2. vyd. ed. Zlín: Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně; 2003.
6. Šima J. *Fotochémia : princípy a aplikácie*. 1. vyd. ed. Bratislava: Bratislava : Slovenská technická univerzita; 2011.
7. Pavlík M. *Výskum prestupu, odrazu a pohltivosti elektromagnetických vln vo vrstvených materiáloch*. Košice, Technická univerzita v Košiciach; 2012.
8. Kubal J. *Základy fotochemie*. 1. vyd. ed. Praha: Praha : Academia; 1969.
9. Ryer A. *Light Measurement handbook*. 1997.
10. Ďurovič M, Krejčí A, Zelinger J, Neuvirt J, Paulusová H, Bacílková B. Závěrečná zpráva grantového úkolu. Vliv světla a ultrafialového záření na archivní dokumenty; 2009; Praha.
11. Lewis-Jones M. Sauer's Manual of Skin Diseases. *British Journal of Dermatology*. 2000;142(6):1268.
12. Milady Skin Care and Cosmetic Ingredients Dictionary, 4th Edition. In. Vol 2. Beaverton: Ringgold Inc; 2015.
13. Klouda P. *Moderní analytické metody*. 2., upr. a dopl. vyd. ed. Ostrava: Ostrava : Pavel Klouda; 2003.
14. Milata V. *Vybrané metody molekulovej spektroskopie*. 1. vyd. ed. Bratislava: Bratislava : Slovenská technická univerzita; 2007.
15. Garaj J. *Analytická chémia*. 1. vyd. ed. Bratislava: Bratislava : Alfa; 1987.
16. centrum NTv. Odrazivost. <https://ftp.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti/odrazivost>. Published 2000. Accessed.
17. Nofi M. Understanding Color Measurement Geometry. <https://www.pcimag.com/articles/102356-understanding-color-measurement-geometry>. Published 2016. Accessed.
18. Dvořáková Z. *DTP a předtisková příprava*. Brno: Computer Press; 2012.
19. Dohnal M. *Fyzikální základy reprodukce obrazu*. 2019.
20. Toužín J. *Stručný přehled chemie prvků*. 1. vyd. ed. Brno: Brno : Masarykova univerzita; 2003.
21. Gažo J. *Všeobecná a anorganická chémia*. 3. vyd. ed. Bratislava: Bratislava : Alfa; 1981.
22. Greenwood NN. *Chemie prvků. Svazek II*. 1. vyd. ed. Praha: Praha : Informatorium; 1993.
23. Housecroft CE. *Anorganická chemie*. Vyd. 1. ed. Praha: Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze; 2014.
24. Navrátil V, Pawera L. *Fotokatalýza v praxi a ve škole*. Brno2014.
25. Klikorka J. *Obecná a anorganická chemie. 2. část*. Brno: Brno : Fakulta chemická VUT; 1995.
26. Klikorka J. *Obecná a anorganická chemie. 3. část*. Brno: Brno : Fakulta chemická VUT; 1995.
27. Moravec. Pásová teorie pevných látek. <http://z-moravec.net/elektronika/zaklady-fyziky-polovoducu/pasova-teorie-pevných-látek/>. Accessed.



28. Fujishima A. *TiO<sub>2</sub> : Photocatalysis. Fundamentals and Applications*. Tokyo: Tokyo : Bkc, Inc.; 1999.
29. Herrmann J-M. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*. 1999;53(1):115-129.
30. Fujishima A, Hashimoto K, Watanabe T. *TiO<sub>2</sub> fotokatalýza : základy a aplikace*. 2002.
31. Evans P, Mantke S, Mills A, Robinson A, Sheel DW. A comparative study of three techniques for determining photocatalytic activity. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2007;188(2):387-391.
32. Fujishima A, Doškár Z, Hashimoto K, Peterka F, Watanabe T. *TiO<sub>2</sub> fotokatalýza : základy a aplikace*. 2002.
33. Mills A, Hill C, Robertson PKJ. Overview of the current ISO tests for photocatalytic materials. *Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry*. 2012;237:7-23.
34. Elmorsi T. *Equilibrium Isotherms and Kinetic Studies of Removal of Methylene Blue Dye by Adsorption onto Miswak Leaves as a Natural Adsorbent*. Vol 022011.
35. Fernandes A, Morão A, Magrinho M, Lopes A, Gonçalves I. Electrochemical degradation of C. I. Acid Orange 7. *Dyes and Pigments*. 2004;61(3):287-296.
36. McMurry J. *Organická chemie*. Vyd. 1. ed: VUTIUM ; Vysoká škola chemicko-technologická; 2007.
37. Acid Orange 7 2-Naphthol 1-Naphthol Dye Azo Compound. <https://imgbin.com/png/RqA6AG3p/acid-orange-7-2-naphthol-1-naphthol-dye-azo-compound-png>. Published 2008. Accessed.
38. Fraser B. *Správa barev : průvodce profesionála v grafice a pre-pressu*. Vyd. 1. ed. Brno: Brno : Computer Press; 2003.
39. Hunt RWG. *Measuring Colour*. 2nd Ed. ed. New York: New York : Ellis Horwood; 1991.
40. Loukotka J. Omietky a ich funkcie. <https://www.asb.sk/>. Accessed.
41. Kralova M, Dzik P, Kasperek V, Vesely M, Cihlar J. Cold-Setting Inkjet Printed Titania Patterns Reinforced by Organosilicate Binder. *Molecules*. 2015;20(9):16582-16603.
42. Corporation FNA. Dimatix Materials Printer DMP-2850. [https://www.fujifilmusa.com/products/industrial\\_inkjet\\_printheads/deposition-products/dmp-2800/index.html](https://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/deposition-products/dmp-2800/index.html). Published 2018. Accessed.
43. Corporation Q-L. QUV Accelerated Weathering Tester. In:2011.

## 7 ZOZNAM SKRATIEK A POUŽITÝCH SYMBOLOV

RTG	röntgenové žiarenie
UV	ultrafialové žiarenie
VIS	viditeľné svetlo
IR	infračervené žiarenie
MW	mikrovlnné žiarenie
RF	rádiofrekvenčné žiarenie
$c_0$	rýchlosť svetla vo vákuu
$\lambda$	vlnová dĺžka
$\nu$	frekvencia (kmitočet)
$\tilde{\nu}$	vlnôčet
$E_{ph}$	energia fotónov
$h$	Planckova konštanta
UV-A	ultrafialová oblasť A
UV-B	ultrafialová oblasť B
UV-C	ultrafialová oblasť C
$T$	transmitancia
$\phi$	žiarivý tok prepustený vzorkou
$\phi_0$	žiarivý tok dopadnutý na vzorku
$\alpha$	absorptancia
$A$	absorbancia
$\varepsilon$	molárny absorpčný koeficient
$c_A$	koncentrácia absorbujúcej zložky v roztoku
$l$	optická dráha
$R$	reflektancia
$\phi_R$	žiarivý tok odrazený od pevnej vzorky
SPIN	zrkadlovo odrazená zložka zahrnutá do merania pomocou integračnej gule
SPEX	zrkadlovo odrazená zložka nezahrnutá do merania pomocou integračnej gule
$O.D.$	optická hustota
MB	metylénová modrá
AO7	Acid orange 7
ISO	medzinárodná organizácia pre štandardizáciu
$E$	intenzita žiarenia
$E_P$	priemerná intenzita fotónov UV-žiarenia
$\lambda_{max}$	vlnová dĺžka UV-žiarenia
$N_A$	Avogadrova konštanta

$R_{deg}$	špecifická rýchlosť degradácie
$\Delta A_\lambda$	rozdiel absorbancií v čase $t_1$ a $t_0$
$V$	pipetovaný objem roztoku metylénovej modrej
$\Delta t$	rozdiel časov $t_1$ a $t_0$
$A_{MB}$	plocha vzorky
$P_{MB}$	špecifická fotoaktivita
$R_{irr\ ON}$	špecifická rýchlosť degradácie počas pôsobenia UV-žiarenia
$R_{irr\ OFF}$	špecifická rýchlosť degradácie za tmy
$\zeta_{MB}$	fotonická účinnosť
CIE	Medzinárodná komisia pre osvetľovanie
$k$	formálna rýchlostná konštanta 1. rádu